LAVORO AMADUZZI

ELEMENTI DI FISICA

AD USO DEI LICEI

VOLUME II.

Termologia, Ottica, Elettrologia, Meteorologia

Con 575 figure e 11 tavole

BOLOGNA
NICOLA ZANICHELLI
EDITORE

PARTE PRIMA

DEL CALORE

CAPITOLO I.

LA TEMPERATURA ED I TERMOMETRI.

§ 1. **Sensazioni di caldo e di freddo - Calore e fenomeni calorifici.** — In prossimità di un fornello acceso, proviamo una sensazione speciale di *caldo* o di *calore*; mentre che il contatto con un pezzo di ghiaccio determina in noi una sensazione opposta, che diciamo di *freddo*. La causa di siffatte impressioni si chiama *calore*. Le sensazioni di caldo e di freddo risultano da azioni esercitate su nervi, che hanno terminazioni alla superficie di tutta la pelle: i nervi sensibili al calore non sono localizzati in un organo speciale, come quelli sensibili al suono e alla luce.

Il *calore*, causa alla quale riferiamo le nostre sensazioni di caldo o di freddo, provoca sui corpi assoggettati alla sua azione fenomeni particolari, detti *calorifici* o *termici*, i quali si riducono ordinariamente alle seguenti categorie: 1° cambiamento di dimensioni o di volume (dilatazioni); 2° cambiamenti di stato fisico (fusione, vaporizzazione); 3° cambiamenti chimici od elettrici (separazione degli elementi di un corpo composto, correnti termo-elettriche).

Il calore non si può considerare, come fu fatto un tempo, quale un agente speciale, materiale. Esso sembra risultare, come si dirà a suo tempo, da un movimento più o meno rapido, da cui sarebbero animate le molecole che costituiscono la materia. Per tal modo lo si considera ora, energia di movimento.

§ 2. **Il calore si misura.** — Il calore può accrescersi o diminuire in un corpo, a seconda delle condizioni nelle quali questo è posto. Se si accresce, si dice che il corpo si *riscalda*, se diminuisce si dice che il corpo si *raffredda*. In conseguenza della possibilità che ha il calore di subire aumento o diminuzione in un corpo, il calore è grandezza misurabile. Per essa si è scelta una conveniente unità di misura, che si chiama *caloria* e che conosceremo a suo tempo.

§ 3. **I corpi, in generale, si dilatano per effetto del calore.** — In generale un corpo che si scalda si dilata; si contrae se si raffredda. Questi effetti, a parità di riscaldamento, sono più o meno pronunciati a seconda della natura dei corpi. Per persuadersi della dilatazione dei solidi si suole eseguire la esperienza dell'anello di Gravesande (Fig. 1), o quella del pirometro di Brogniard (Fig. 2). I liquidi si dilatano più dei solidi: lo prova la esperienza (Fig. 3) col pallone di vetro prolungantesi in un tubo e pieno di un liquido colorato. I gas si dilatano (Fig. 4) più ancora dei liquidi.

§ 4. **I vari corpi si dilatano differentemente.** — Come i gas si dilatano in generale più dei liquidi e questi più dei solidi, così i vari liquidi ed i vari solidi si dilatano in misura differente, come può apparire con facili osservazioni. Manifestazioni indirette di questa circostanza se ne hanno numerose, specialmente per i solidi. Così quando due corpi capaci di dilatarsi differentemente si trovano intimamente legati, l'un d'essi può rompersi se si riscalda o se si raffredda il sistema. Può anche avvenire che i due corpi diversamente dilatabili, per azione reciproca deformino il sistema. Così due lamine metalliche, l'una di ferro e l'altra di ottone, ben fissate con chiodi l'una all'altra, quando vengono riscaldate si piegano per modo che la concavità del sistema sia dalla parte del metallo meno dilatabile, cioè dalla parte del ferro (Fig. 5).

Doppie lamine formate di due metalli variamente dilatabili e ben collegati l'uno all'altro si sogliono chiamare *lamine compensatrici*, per una ragione che diremo in seguito (§ 22).

§ 5. **La temperatura.** — Il calore dunque è misurabile. Di più, è possibile operare in modo da dare a corpi differenti una medesima quantità di calore o quantità varie ben determinate.

Supponiamo di disporre di diversi recipienti contenenti masse differenti di acqua, e supponiamo di far sì che in queste masse d'acqua vengano a trovarsi uguali quantità di calore. Poi, successivamente e ad intervalli, immergiamo in questi vari recipienti una mano. Ne ritrarremo, ad esempio, in ogni caso una impressione di caldo; ma queste impressioni avranno indubbiamente varia intensità, tanto meno calda risultandoci la massa maggiore di acqua.

Masse uguali di corpi differenti, possedenti uguali quantità di calore, possono dare risultato simile.

Riceviamo impressioni di caldo, lo abbiamo detto, perchè passa calore dall'acqua al nostro corpo.

Come avverrà allora che, essendo uguale la quantità di calore posseduta dalle diverse masse di acqua, nei diversi casi, passano al nostro corpo quantità diverse di calore?

La ragione è questa, che oltre alla *quantità di calore* che un corpo possiede, deve nel corpo stesso considerarsi anche la *tendenza* più o meno grande di questo calore, a passare in un altro corpo opportuno, col quale sia messo a contatto.

Questa *tendenza* costituisce un qualche cosa di assolutamente diverso da ciò che è la *quantità di calore* posseduta dal corpo: si tratta della cosidetta *temperatura* del corpo.

Due corpi possono avere uguale quantità di calore e diversa temperatura; come può succedere che ad un corpo che abbia maggior quantità di calore di un altro, corrisponda una temperatura inferiore a quella di quest'altro. Hanno ugual temperatura due corpi che posti a contatto l'uno dell'altro, non si scambiano calore. Hanno temperatura differente due corpi che posti a contatto si scambiano calore: dei due è a temperatura più elevata quello che cede calore.

Non si può definire una temperatura doppia, tripla, quadrupla ecc. di un'altra; ragione per cui non è lecita *la misura* (nel senso corretto della parola) *di una temperatura*, ma solo si possono misurare *differenze di temperatura*.

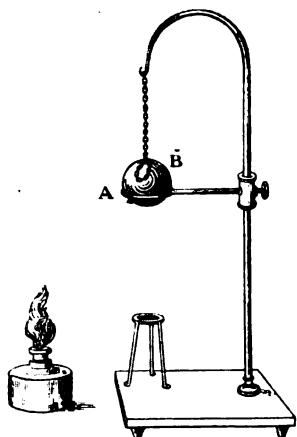



Fig. 1. - La sfera che prima di essere scaldata passa a cappello per l'anello fissato alla colonna, dopo il riscaldamento non passa più.

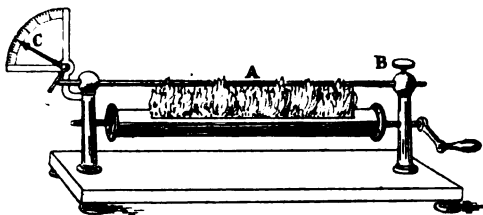



Fig. 2. - Il cilindro che è fissato a destra da una vite *B*, per il riscaldamentò si allunga verso l'estremo libero sinistro, determinando lo spostamento di un indice sul quadrante graduato.

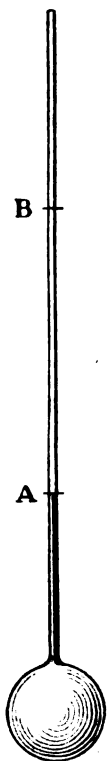



Fig. 3. - Per accorgersi della dilatazione dei liquidi basta scaldare un pallone di vetro continuantesi in un tubo di vetro e contenente liquido sino ad un certo punto *A* del tubo. Per il riscaldamento del sistema, il liquido eleva il proprio livello nel tubo, dopo averlo momentaneamente abbassato quando il riscaldamento determinante l'aumento di capacità del recipiente non si era ancor fatto sentire nel liquido.

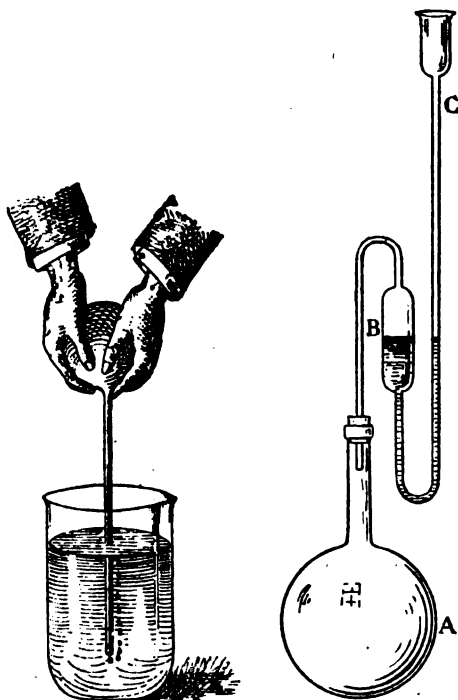



Fig. 4. - Per i gas basta capovolgere su acqua un pallone di vetro prolungantesi in un tubo pure di vetro, e scaldare il pallone. L'aria del pallone si dilata ed esce gorgogliando poi attraverso l'acqua. Meglio è usare il sistema rappresentato dalla figura a destra. In alto, ad un pallone pieno di aria è collegato il tubo ricurvo *BC* contenente in una parte piegata ad *U* un po' d'acqua che sta allo stesso livello nei due rami dell'*U*. Se si scalda l'aria del pallone collo scaldare questo esternamente, il liquido si abbassa nel ramo sinistro e si eleva nel ramo destro.

Nella pratica difatti ogni valutazione di temperatura si riduce a misurare la differenza fra la temperatura di un corpo e la temperatura di riferimento di un altro, al quale si dà il nome di *corpo termometrico.*

§ 6. **Termometri - La scala centigrada o di Celsius.** — Come si valuta la temperatura dei corpi? Non certo ricorrendo ai nostri sensi, perchè sono oltremodo fallaci.

Quando immergiamo una mano in acqua che sia stata mantenuta sopra ad un fornello, proviamo una sensazione di caldo; immergendola invece in acqua non riscaldata proviamo impressione di freddo, perchè nel primo caso va calore dall'acqua riscaldata al nostro organismo attraverso alla mano immersa, e nel secondo caso va calore dal nostro organismo, sempre attraverso alla mano, all'acqua non riscaldata.

Operando correttamente come ora abbiamo indicato, i sensi possono servire a confronti di temperatura; ma non si potrebbero invocare in generale come atti a misure. Basta, per convincersene, una semplice esperienza, che ognuno può fare molto semplicemente. Si metta una mano, la sinistra ad esempio, in un catino contenente acqua fredda, e l'altra, la destra, in un recipiente contenente acqua ben calda. La mano sinistra proverà, e giustamente, una sensazione di freddo; la mano destra una sensazione di caldo. Facciamo versare in un terzo recipiente l'acqua fredda e l'acqua calda, così che si mescolino. Poi immergiamo le due mani nel miscuglio, che avrà temperatura intermedia fra quella dell'acqua fredda e quella dell'acqua calda, ma uniforme. Ebbene, la mano destra proverà sensazione di freddo e la sinistra sensazione di caldo. I nostri sensi, appunto perchè si ricordano di una impressione precedentemente provata, apprezzano diversamente una medesima condizione termica. Sono quindi fallaci.

Val bene invece la materia inanimata; ad intenderlo basta riflettere che se ci riferiamo alla temperatura di un certo corpo, solido per esempio, si può constatare se un altro corpo ha temperatura maggiore o minore di esso, semplicemente osservando se quest'altro corpo, messo a contatto col primo, si dilata o si contrae, se riceve cioè calore o se ne perde. Di più, si può valutare la differenza di temperatura, misurando la dilatazione o la contrazione.

I *termometri,* che servono appunto a valutare tali differenze di temperatura, o, come si dice, fissata la temperatura di riferimento, a misurare le temperature dei corpi, sono fondati su questo principio, come si comprenderà subito, non appena si sappia come sono fatti e come vengono usitati. Sono in uso diversi tipi di termometri, ma noi ora ci limiteremo a considerare quello adoperato più frequentemente, vale a dire il *termometr' a mercurio.*

Esso si compone (Fig. 6) di un tubo sottile di vetro che termina inferiormente con un serbatoio sferico o cilindrico ed è chiuso alla sua estremità superiore. Il serbatoio ed una parte del tubo contengono mercurio puro; il tubo, o una tavoletta contro cui questo sia fissato, porta una scala a gradi, che può far conoscere le dilatazioni o le contrazioni del mercurio e quindi le variazioni di temperatura, col variare delle condizioni atmosferiche locali, o col passaggio dell'apparecchio da un luogo ad un altro, o dal contatto con un corpo al contatto con un altro. Per costruire la graduazione si utilizza la nozione (della quale dovremo occu-

parci in seguito) che nell'aria alla pressione di 76 cm., il ghiaccio fonde sempre alla stessa temperatura, che è fissa e determinata, come è fissa e determinata la temperatura alla quale bolle l'acqua. Si immerge il termometro in un recipiente (Fig. 7) contenente ghiaccio in fusione, si aspetta che il mercurio assuma un livello fisso nel tubo e ivi si segna *zero*. Si mette poi il termometro in seno a vapori sovrastanti ad acqua in ebollizione, si aspetta che il mercurio si fermi ad un determinato livello ed in corrispondenza di questo si segna *cento*. Si divide l'intervallo compreso fra lo zero e il cento in cento parti uguali: ognuna di queste parti corrisponde alla variazione di livello per la variazione di un grado di temperatura. Portando ripetutamente in luogo che mantenga inalterate le proprie condizioni termiche, ossia mantenga inalterata la propria temperatura, un medesimo termometro o termometri ugualmente graduati, il livello del mercurio in questi salirà sempre alla medesima divisione della graduazione. Il numero di tale divisione si assume come misura della temperatura di quel luogo. Per compiere la operazione che consente di segnare il numero cento, ci si vale di un apparecchio detto *stufa del Regnault*, rappresentato dalla Fig. 8. È una stufa in ottone che ha un collo cilindrico allungato, a cui è sovrapposto, capovolto, un recipiente cilindrico munito di tre aperture: una all'estremo superiore, che, per mezzo di un tappo, trattiene il termometro; una laterale, munita di un tubicino rivolto in basso, che lascia uscire il vapore; un'altra, pure laterale, che dà adito ad un tubicino laterale del collo interno della stufa, trattenente un manometro a mercurio. Con questa disposizione il vapore di acqua che si forma dal liquido in ebollizione invece di uscire subito dalla stufa percorre una concamerazione circondante il collo della stufa e protegge questa ed il tubo termometrico da raffreddamenti esteriori.

Usando di un tubo molto lungo e disponendo nel termometro il mercurio, per modo che nel ghiaccio in fusione il livello del mercurio venga e fissarsi molto al di sopra del bulbo, si può proseguire al di sotto dello zero la graduazione fatta fra lo zero ed il cento, segnando successivamente, ed in ordine crescente verso il basso, i numeri 1, 2, 3 ecc., finchè vi sono gradi da numerare. Le temperature corrispondenti a questi gradi si dicono *temperature sotto lo zero* per contrapposto alle altre che si chiamano *sopra lo zero*. Si è convenuto di rappresentare le prime preponendo il segno — (*meno*) ai numeri che le valutano, e di rappresentare le altre, sia coi numeri che le valutano senza prepor loro alcun segno, sia preponendo loro il segno + (*più*). Come ognuno facilmente intende, più grande è il valore (assoluto) del numero che rappresenta una temperatura sotto zero, più bassa è la temperatura; più grande è il valore (assoluto) del numero che rappresenta una temperatura sopra zero, più alta è la temperatura.

Come abbiam veduto essere possibile la scala termometrica al di sotto dello zero, così si comprenderà la possibilità di costruire termometri la cui scala possa prolungarsi oltre il numero cento.

La graduazione sopra considerata per il termometro è la più usitata, e riceve il nome di *scala centigrada o di Celsius*.

§ 7. **Scale Réaumur e Fahrenheit.** — Oltre alla centigrada sono in uso altre due scale: la Réaumur e la Fahrenheit (Fig. 9).

La *scala Réaumur* differisce dalla centigrada solo perchè in corrispondenza della temperatura dell'acqua in ebollizione si segna 80 invece di 100 e l'intervallo fra lo zero e l'ottanta si divide in ottanta parti uguali. Tale scala si chiama anche *ottantigrada.*

Ottanta gradi Réaumur equivalgono dunque a cento centigradi, epperò il grado Réaumur è più grande del centigrado nella proporzione di 5 a 4. Da ciò risulta facile il passaggio dalla valutazione di una temperatura, fatta con un termometro centigrado o Réaumur, alla valutazione della temperatura in scala Réaumur o centigrada, rispettivamente. I gradi di Réaumur si riducono a centigradi moltiplicandoli per $^5/_4$ ed i centigradi a Réaumur moltiplicandoli per $^4/_5$.

Nei paesi nordici si usa la *scala Fahrenheit,* nella quale alla temperatura del ghiaccio fondente corrisponde il grado 32 e a quello dell'acqua bollente il 212. È chiaro che ad 80° Réaumur ed a 100° centigradi corrispondono 212° — 32° = 180° Fahrenheit, cosicchè il grado Fahrenheit è più piccolo del centigrado nella proporzione di 5 a 9.

Da tutto questo è facile capire come, per passare dalla temperatura segnata da un termometro Fahrenheit a quella segnata da un termometro centigrado, o per fare il passaggio inverso vale la seguente relazione:

$$\frac{N_f - 32}{N_c} = \frac{9}{5}$$

nella quale N_f ed N_c rappresentano rispettivamente i valori di temperatura misurata in scala Fahrenheit e centigrada.

§ 8. **Termometri ad alcool, a toluene, a gas.** — Per le temperature basse si suole usare un termometro che invece di contenere mercurio contiene *alcool.* Il mercurio difatti solidifica a 39° sotto zero e quindi esso non può servire a misurare temperature inferiori a questa. L'alcool invece rimane liquido fino a temperature molto basse e può servire a valutare temperature più basse di - 90°, perchè l'alcool congela a - 130° e prima di assumere questo aspetto diventa vischioso. Siccome l'alcool bolle alla temperatura di 78°, per graduare un termometro ad alcool, lo si confronta con un termometro a mercurio, operando nel modo seguente: dopo aver segnato lo zero, in base all'immersione nel ghiaccio fondente, si immerge il termometro ad alcool in un bagno a 60° o 70° e si segnano su di esso le temperature date da un termometro a mercurio, immerso nello stesso bagno. Si hanno così i gradi centigradi del termometro ad alcool, che si possono poi estendere al di sotto dello zero. Per rendere ben visibile il liquido in un termometro ad alcool, questo viene colorato ordinariamente in rosso.

Le temperature più basse di quelle rilevabili coi termometri ad alcool si hanno sostituendo all'alcool certi liquidi, come il *toluene* e l'*etere di petrolio* o gazolina. Con la gazolina, che è molto volatile, si apprezzano temperature fino a - 190°.

Per temperature ancor più basse, del pari che per temperature qualunque, serve un termometro che ha per corpo termometrico un *gas,* come l'idrogeno o come l'aria. Non possiamo noi dire come sia fatto e come si adoperi un siffatto termometro. Ci limiteremo ad asserire che esso costituisce il termometro più esatto e a ricordare che il primo

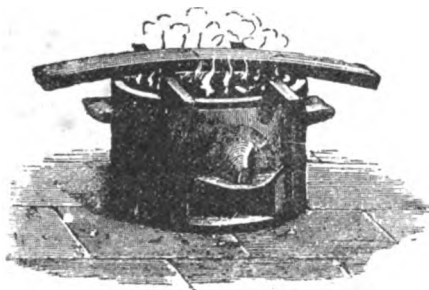



Fig. 5. - Come si incurva, per la dilatazione varia del ferro e del rame una doppia lamina, superiormente in rame ed inferiormente in ferro, che sia posta su di un braciere.

Fig. 7. - Dispositivo per fissare lo zero di un termometro. È un recipiente ove si può collocare ghiaccio fondente, ed entro cui, fra il ghiaccio, si pone il termometro da graduare.

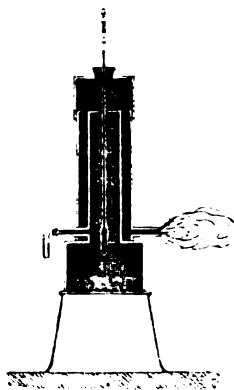



Fig. 8. - Stufa del Regnault per riscaldare alla temperatura dell'acqua bollente un termometro da graduare.

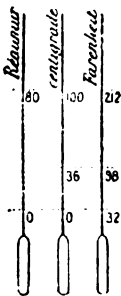



Fig. 9. - Confronto delle 3 scale termometriche Réaumur, centigr. e Fahrenheit.

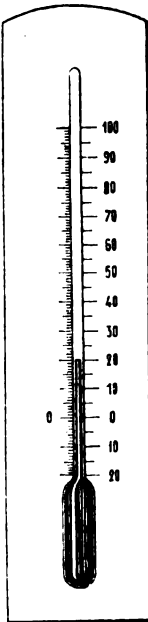



Fig. 6. - Un termometro a mercurio con graduazione centigrada su una tavoletta alla quale è fissato.

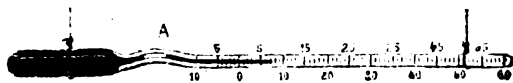



Fig. 10. - Un termometro a massima. La strozzatura *A* impedisce al mercurio che è andato a segnare la temperatura di 7° di retrocedere. Si riporta il mercurio a collegarsi col mercurio del tubo, mediante scosse brusche impresse al termometro nel senso che va dal tubo al bulbo.

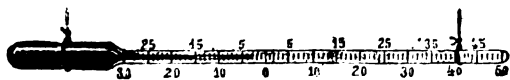



Fig. 11. - Un termometro a minima. Un corpicciuolo munito di una sottile anima di ferro è incorporato nel tubo entro il liquido (alcool) termometrico. Esso viene trascinato verso il bulbo dal menisco del liquido medesimo a mano a mano che questo si ritrae. Va quindi a segnare la temperatura più bassa che si ebbe nell'ambiente ove fu collocato il termometro, dal momento in cui con una calamita esteriore si trascinò il corpicciuolo con anima di ferro ad aderire entro al liquido col menisco di questo.

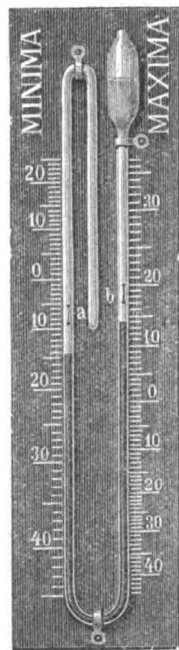



Fig. 12. - Termometro a massima ed a minima i cui indici *a* e *b* sono costituiti come quello al quale si è accennato nella leggenda della Fig. 11. Il liquido scuro è mercurio, l'altro, che lo continua da una parte e dall'altra, è alcool.

termometro, quale fu quello descrittoci da Galileo, fu appunto un termometro a gas il cui corpo termometrico era l'aria.

§ 9. **La scala assoluta.** — Giacchè abbiamo parlato di scale termometriche varie, non possiamo esimerci dal dire che gli scienziati usano spesso una scala detta *scala assoluta*, priva di quel carattere di arbitrarietà che hanno le altre. Ha come gradi i gradi centigradi e come zero la temperatura di - 273° C.

Non è stata difatti arbitraria la scelta dello zero, in corrispondenza della temperatura del ghiaccio in fusione? E arbitraria la scelta del numero 100 per la temperatura dell'acqua in ebollizione? Lo abbiamo implicitamente ammesso, quando si è detto che nella scala Réaumur, alla temperatura dell'acqua in ebollizione, si fa corrispondere 80° e nella scala Fahrenheit, alla temperatura del ghiaccio in fusione, si fa corrispondere il grado 32.

Sembrerebbe logico, sebbene la temperatura di un corpo non vada confusa con la quantità di calore che questo possiede, ideare una scala delle temperature il cui zero corrispondesse proprio alle condizioni termiche di un corpo privo affatto di calore. Non è certo privo di calore un pezzo di ghiaccio in fusione, cioè alla temperatura di zero gradi centigradi; non si concepirebbero allora le temperature sotto lo zero. Ebbene, considerazioni di ordine teorico, che qui non possiamo accennare, portano a ritenere che un corpo sia privo affatto di calore, quando si trovi alla temperatura di - 273° C. La scala assoluta delle temperature ammette questa temperatura come zero proprio, e assume come gradi quelli centigradi a noi già noti. Ne segue che lo zero centigrado ha per valore, nella scala assoluta, 273° e che ogni temperatura centigrada superiore a 0° si tradurrà in temperatura assoluta, aggiungendo il numero 273, mentre ogni temperatura inferiore a 0° si tradurrà in assoluta togliendo da 273 il numero corrispondente ai gradi centigradi osservati. Per chi ha nozioni di algebra si dirà in generale che per passare da una temperatura centigrada qualunque alla corrispondente temperatura assoluta si aggiungerà algebricamente 273 al numero positivo o negativo che la misura.

§ 10. **Termometri a massima e a minima.** — Si chiamano in genere termometri *a massima* o termometri *a minima*, quelli che fanno conoscere la temperatura più alta o quella più bassa, rispettivamente, raggiunta in un determinato periodo di tempo (una giornata ad esempio - Fig. 10 e 11).

Ingegnoso è il termometro Six e Bellani, che è insieme termometro a massima e a minima. In un termometro ad alcool, costituito dalla parte estrema superiore del tubo (Fig. 12), l'alcool è continuato da mercurio e questo ancora da alcool nell'ultimo vano del tubo due volte piegato ad arco; al disopra del mercurio, alle due estremità di esso, sono collocati due indici in ferro, mobili mercè lo spostamento del mercurio, e capaci di ritornare al posto voluto, mediante l'uso di una calamita esteriore.

Supponiamo l'apparecchio posto nel ghiaccio fondente e gli indici condotti al livello del mercurio. Una elevazione della temperatura porta l'indice *b* in alto e lo lascia in corrispondenza della posizione più elevata, assunta dal livello del mercurio. Un abbassamento di temperatura

opera simile spostamento dell'indice *a*. Alle varie posizioni che possono assumere gli indici corrispondono graduazioni opportune, che fanno per tal modo conoscere la temperatura più alta e quella più bassa, segnata dall'apparecchio.

Per *temperatura media della giornata* si intende la media aritmetica dei valori osservati in corrispondenza delle varie ore. Spesso però ci si limita a fare la media dei valori massimo e minimo che la temperatura ha raggiunto nella giornata e della temperatura in corrispondenza di due ore determinate, ma varie da luogo a luogo. Nell'uso del termometro per valutare la temperatura dell'aria bisogna osservare qualche prescrizione. Così l'istrumento deve essere protetto dai raggi diretti del Sole e deve essere posto ad una certa distanza dal suolo, dai muri, dai corpi insomma che potrebbero rimandare il calore solare.

Per il medico lo studio dell'andamento della temperatura di un malato è indicazione oltremodo preziosa, per identificare la malattia e per seguirne con intelligenza il corso.

Troppo incomodo ed insufficiente sarebbe l'uso di un comune termometro centigrado. Difatti, ponendosi ordinariamente il termometro sotto l'ascella del malato, questo, deve starsene ben coperto; il lungo e fragile tubo di un ordinario termometro centigrado sarebbe d'imbarazzo; oltre a ciò, possedendo tale tubo tutti i gradi dallo zero al cento, per quanto lungo, non consentirebbe che l'apprezzamento di gradi interi o di grandi frazioni di grado, mentre al medico interessano le variazioni del decimo di un grado. È facile l'accordo di tutte le esigenze, se si riflette che la temperatura di un uomo non scende mai al di sotto di 35° e se va oltre i 42° ne segue la morte. Interessano quindi i gradi centigradi dal 35 al 42 o 45.

Siffatta estensione ha appunto la scala del *termometro clinico*, usato dai medici. Il tubo di un siffatto termometro può quindi essere corto, non imbarazzante, nè fragile; di più, se, come di solito si fa, il tubo ha una sezione interna molto piccola rispetto alla capacità del bulbo, ogni grado può venir suddiviso in dieci parti e il termometro apprezzare con ciò i decimi di grado. Per la graduazione di un termometro clinico, non essendo possibile riferirsi allo zero od al cento, si procede, come pel termometro ad alcool, al confronto con un termometro comune. Per ultimo diremo, a proposito dei termometri clinici, che essi sono termometri *a massima*, in quanto dopo che pel contatto hanno presa la temperatura del corpo, estratti che siano, continuano ad indicare tale temperatura più elevata di quella dell'ambiente, se non si scuotono vibratamente dall'alto al basso, come ognuno avrà veduto fare.

Gli è che quando il termometro vien tolto, il mercurio si contrae, ed essendovi nel tubo al di sopra del bulbo una forte strozzatura, la colonna di mercurio si spezza e la parte superiore di essa continua ad indicare una temperatura sensibilmente uguale a quella che il termometro ritrasse dall'ammalato.

§ 11. **Spostamento dello zero.** — A proposito dei termometri a mercurio va indicato l'inconveniente dello spostamento dello zero, il quale consiste in ciò, che i termometri immersi nel ghiaccio fondente, qualche tempo dopo che furono graduati, in generale non segnano esattamente lo zero, ma una frazione di grado, un grado, o anche più,

sopra quel punto. Il fatto, scoperto dal canonico Bellani nel 1823, è dovuto ad una lenta contrazione che ha subito il bulbo dopo che lo strumento venne graduato.

Perciò, onde servirsi di un termometro per osservazioni precise di temperatura, conviene conoscere quale è (per esso) il valore del detto spostamento e sottrarlo dalle indicazioni che esso dà.

§ 12. **Qualità di un termometro.** — Un termometro oltre che giusto (e tale sarà se costruito con tutte le cautele) dovrebbe essere *sensibile* e *pronto*. Si dice *sensibile* quando indica le più piccole variazioni di temperatura. Per la sensibilità è necessario che la capacità del bulbo sia assai grande rispetto al diametro interno del cannello, che dovrà essere esilissimo, e ciò perchè, ottenendosi per tal modo i gradi lunghi, potranno leggersi le frazioni di grado. Si dice *pronto* un termometro quando indica subito le piccole variazioni di temperatura. Per questa dote occorre che la massa del mercurio nel bulbo risenta presto tali variazioni; e quindi tal massa dev'essere piccola ed il bulbo deve avere la massima superficie esterna. Le due qualità appaiono in certo senso contradditorie; in pratica si fa un bulbo di proporzioni medie e si evita per esso la forma sferica, perchè la sfera è il solido che a parità di volume ha la minima superficie esterna: gli si dà forma cilindrica.

§ 13. **Termometri industriali.** — I termometri descritti nei precedenti paragrafi possono essere così come sono utilizzati nell'industria, quando abbiano forme atte ad un uso facile ed efficace. Inoltre, poichè il mercurio bolle alla temperatura di 360°, la misura di temperature più elevate di questa non si può effettuare con termometri a mercurio; e allora si ricorre a termometri speciali.

Sotto la denominazione di *termometri a quadranti* si costruiscono dei serbatoi in ferro, pieni di mercurio in comunicazione con un tubo manometrico, collegato ad un indice mobile su di un quadrante graduato. La graduazione può andare fino a 500°.

Sotto la denominazione di *pirometri a quadranti* si impiegano apparecchi simili ai precedenti, ma il cui serbatoio contiene azoto. L'indicazione vien fatta ancora con un tubo manometrico, collegato ad un ago mobile su quadranti. I pirometri ad azoto sono generalmente graduati sino a 500°.

Questi termometri e pirometri industriali sono costosi e d'altra parte di un impiego non sempre comodo. Non occorrendo d'altra parte per certe industrie (metallurgiche) grande precisione, nella misura delle temperature, si apprezzano spesso queste ad occhio, basandosi sul colore che assumono i pezzi metallici, quando si scaldano. Così per il caso del ferro:

il rosso nascente corrisponde a	750°	circa
il rosso cupo	800°	»
il rosso ciliegia	900°	»
il rosso aranciato	1100°	»
il bianco	1300°	»
il bianco vivissimo	1500°	»

CAPITOLO II.

STUDIO DELLE DILATAZIONI.

DILATAZIONE DEI SOLIDI.

§ 14. **Dilatazione dei solidi - Le varie dilatazioni: lineare, superficiale e cubica.** — Le variazioni di grandezza prodotte in un corpo solido da un aumento di temperatura possono riferirsi secondo che interessa, ad una sola, a due, oppure a tutte tre insieme le sue dimensioni. Da ciò i tre generi di dilatazione: la *lineare*, la *superficiale* e la *cubica*; a seconda che del corpo si consideri la dilatazione in lunghezza, in superficie od in volume, corrispondenti alla rispettiva considerazione di una, o contemporaneamente di due o di tre dimensioni.

Una sbarra di ferro di un metro di lunghezza a 0°, si allunga di mm. 1,2 allorchè la si porta a 100°. Nelle stesse condizioni, una sbarra di ottone mostra un allungamento di mm. 1,9 nel passare da 0° a 100°; in sostanza, si può dire che i diversi metalli si dilatano inegualmente per un medesimo riscaldamento; l'ottone si dilata più del ferro, il piombo e lo zinco più dell'ottone. Si è ottenuto un acciaio, nel quale è incorporato del nichel, che presenta una dilatabilità praticamente nulla. Lo si è chiamato *invar*, ed è largamente utilizzato nella costruzione di molti strumenti scientifici di precisione.

§ 15. **Leggi della dilatazione dei solidi.** — Per vedere da vicino le modalità della dilatazione termica dei solidi, ricorriamo al dispositivo usato da Lavoisier e Laplace. Riduciamo il corpo da studiare in forma di sbarra AB (Fig. 13), appoggiandolo poi da un lato contro un ostacolo A irremovibile, e dall'altro contro una spranga OB, girevole intorno ad un asse orizzontale O. Al medesimo asse è fissato un cannocchiale LL, girevole coll'asse e con la spranga OB. A distanza nota da O trovasi un'asta CC', divisa in parti uguali. Circondata la sbarra AB di ghiaccio a 0°, il cannocchiale prenderà la posizione LL, per esempio, e la visuale, condotta pel punto d'incrociamento de' suoi fili micrometrici, sarà diretta alla divisione C dell'asta graduata. Portando poi la sbarra AB in un bagno d'acqua e d'olio, e, per opera del calore, sottoponendo il liquido successivamente a differenti temperature, indicate da termometri, avverrà che ad una certa temperatura t, la lunghezza della sbarra diventerà AB'; la spranga OB ed il cannocchiale LL avranno raggiunto allora rispettivamente le posizioni OB', $L'L'$, e la visuale si dirigerà, sull'asta graduata, in C'. Potremo così misurare le lunghezze $CC' = n$, $OC = a$, $OB = b$, $AB = l$, e calcolare quindi l'allungamento della sbarra

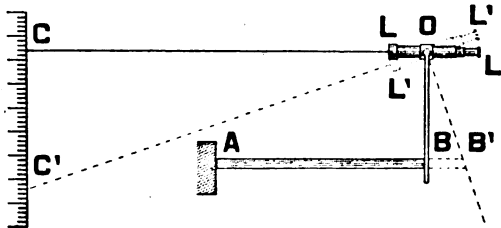



Fig. 13.

$BB' = h$, dovuto al riscaldamento di t gradi. Invero i due triangoli OCC', OBB' danno $a : n = b : h$, d'onde $h = \frac{nb}{a}$.

Modificando opportunamente le condizioni dell'esperienza si trova:

1. *L'allungamento è proporzionale alla lunghezza* l, *che ha la spranga a 0°.*
2. *Per temperature comprese fra 0° e 100° l'allungamento è approssimativamente proporzionale all'intervallo da 0° a* t°, *di cui si è riscaldata la spranga.*
3. *A parità di tutte le circostanze l'allungamento è differente per i diversi metalli costituenti la spranga.*

§ 16. **I coefficienti di dilatazione.** — Onde caratterizzare i diversi corpi in base alla dilatabilità loro per effetto del calore, si è pensato di valutare, per ciascuno di essi, l'allungamento che subisce una sbarra, lunga un centimetro, quando si innalzi di un grado la sua temperatura, ammettendo, per le considerazioni meno rigorose, che tale allungamento non varii col variare della temperatura di partenza, e sia dato dal valore medio per un largo intervallo di temperatura. Tale allungamento si chiama *coefficiente di dilatazione lineare,* perchè riguarda l'aumento secondo una sola delle dimensioni del corpo considerato. Così, pel caso citato del ferro, il coefficiente di dilatazione lineare, desunto come valor medio dell'allungamento subìto nell'intervallo di temperatura da 0° a 100°, sarà $\frac{0{,}12}{10000}$.

In generale, se l_o è la lunghezza di una sbarra a zero gradi, l_t è la lunghezza a $t°$, il coefficiente di dilatazione lineare, desunto come media fra 0° e $t°$, è $\frac{l_t - l_o}{l_o t}$; giacchè la dilatazione lineare totale, subìta dalla spranga fra 0° e $t°$, è $l_t - l_o$, la dilatazione dell'unità di lunghezza è $\frac{l_t - l_o}{l_o}$, e finalmente la dilatazione media dell'unità di lunghezza, quando la temperatura si eleva di un grado, è $\frac{l_t - l_o}{l_o t}$. La rappresenteremo con α. Questo numero è sempre piccolissimo. (Per l'acciaio duro ha il valore 0,0000114 e per il platino il valore 0,00000907). Varia da un corpo all'altro e, per un medesimo corpo, varia colla temperatura.

In modo simile, se del corpo si considera l'aumento che subisce l'unità di volume per l'innalzamento di un grado di temperatura, si ha il *coefficiente di dilatazione cubica,* che sensibilmente (come vedremo) per una medesima sostanza, è numericamente uguale al triplo del coefficiente di dilatazione lineare. E con notazioni analoghe a quelle usate per la dilatazione lineare, il coefficiente medio γ di dilatazione cubica fra 0° e $t°$, si esprimerà mediante la relazione:

$$\gamma = \frac{V_t - V_o}{V_o t}.$$

A proposito della dilatazione cubica è bene notare come un corpo cavo si dilati esattamente, come se fosse massiccio.

Analogamente si definirà il *coefficiente di dilatazione superficiale*, la cui espressione sarà:

$$\beta = \frac{S_t - S_o}{S_o t},$$

e la cui considerazione, se non ha l'interesse degli altri due coefficienti, giova tuttavia in qualche caso pratico.

§ 17. **Relazione fra i tre coefficienti.** — Se abbiamo una lamina metallica quadrata (Fig. 14) di lato uguale all'unità, e ne innalziamo di un grado la temperatura, avverrà — se α è il solito coefficiente di dilatazione lineare — che il lato diverrà $1 + \alpha$. In conseguenza il quadrato acquisterà un'area

$$(1 + \alpha)^2 = 1 + 2\alpha + \alpha^2.$$

L'aumento di area subito (coefficiente β di dilatazione superficiale) sarà dato da

$$(1 + \alpha)^2 - 1 = 1 + 2\alpha + \alpha^2 - 1 = 2\alpha + \alpha^2.$$

Ma se si pensa che α è abbastanza piccolo (il maggior valore è 65×10^{-6}), ne avverrà che α^2 sarà trascurabile, perchè $\alpha^2 = 4225 \times 10^{-12}$. Si ha quindi sensibilmente $\beta = 2\alpha$.

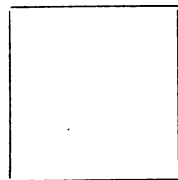
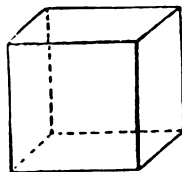



Fig. 14.

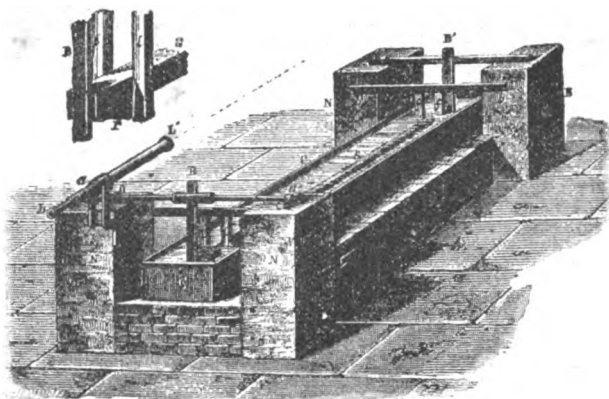
Fig. 15.

Se abbiamo un cubo (Fig. 15) di spigolo uguale all'unità e ne innalziamo di un grado la temperatura, lo spigolo diverrà $(1 + \alpha)$ e il cubo assumerà un volume $(1 + \alpha)^3 = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3$. Ma α^3 e α^2 sono trascurabili per quanto abbiamo detto più sopra, quindi sensibilmente $(1 + \alpha)^3 = 1 + 3\alpha$. L'aumento di volume subìto dal cubo (coefficiente γ di dilatazione cubica) sarà dato da $\gamma = (1 + \alpha)^3 - 1 = 1 + 3\alpha - 1 = 3\alpha$.

Possiamo dunque concludere che sensibilmente il *coefficiente di dilatazione superficiale è doppio di quello di dilatazione lineare, e che quello di dilatazione cubica è triplo.*

Apparisce di qui tutta l'importanza che ha la determinazione del coefficiente di dilatazione lineare dei vari corpi, poichè da esso si possono poi dedurre facilmente i coefficienti di dilatazione superficiale e cubica. Vari metodi furono ideati a questo scopo. Classico è il metodo dei fisici francesi Lavoisier e Laplace.

§ 18. **Metodi di misura dei coefficienti di dilatazione lineare.** — 1. Si può ricorrere al dispositivo di Lavoisier e Laplace di cui si parlò nel § 15.

Il coefficiente di dilatazione lineare α della sbarra è $\alpha = \frac{nb}{alt}$. La Fig. 16 rappresenta l'apparecchio classico usato nelle esperienze da Lavoisier e Laplace: S è la sbarra; B' una lamina verticale, che forma l'ostacolo fisso, contro cui la sbarra appoggia un suo estremo; B un'altra lastra verticale, che corrisponde alla spranga OB della Fig. 13; LL' il cannocchiale.

Fig. 16.

2. Ramsden suggerì ed usò questo altro metodo. Si colloca la spranga *CD* (Fig. 17), di cui si vuole misurare lo allungamento, parallelamente, tra due altre spranghe *AB*, *EF* di lunghezza invariabile e tenute nel ghiaccio fondente. Ogni spranga è contenuta in una bacinella parallelepipeda e porta ai capi, sollevata in alto, una mira consistente in un disco con un forellino centrale. La spranga *CD* ha il capo *C* fisso contro un ostacolo, ed è così collocata, che quando essa è circondata di ghiaccio fondente, le tre mire *a*, *c*, *e*, ai capi *A*, *C*, *E* siano in linea retta, e lo stesso avvenga per le tre mire *b*, *d*, *f* ai capi *B*, *D*, *F*. Ciò preparato, lasciando le altre due sempre nel ghiaccio fondente, si circonda la spranga *CD* di un liquido, che si fa riscaldare fino alla temperatura *t*, nota. La mira dell'estremo *D* uscirà dalla linea retta delle sue corrispondenti. Sicuri che le tre mire degli estremi *A*, *C*, *E* sono ancora in linea retta; con una vite micrometrica applicata alla mira *d* ora passata in *d'*, la si fa scorrere lungo la sbarra *CD* nella direzione *DC*, finchè la mira *d'* torni in *d* sulla linea retta delle altre due *b*, *f*. La vite ha un passo noto, ed il numero de' giri necessari, per produrre l'effetto descritto, farà conoscere l'allungamento della sbarra *AB*. Da esso si dedurrà il suo coefficiente di dilatazione.

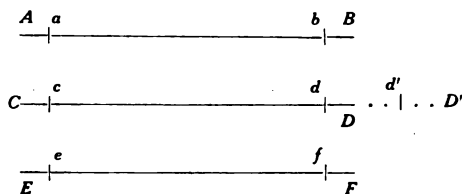



Fig. 17.

3. Dulong e Petit applicarono alla misura della dilatazione dei solidi un apparecchio che descriveremo e che si chiama termometro a peso.

§ 19. **Problemi sulle dilatazioni.** — La conoscenza dei coefficienti di dilatazione lineare, superficiale e cubica permette la soluzione di numerosi ed importanti problemi scientifici e pratici. Così è facile stabilire l'allungamento che subisce una spranga di un materiale determinato, di cui sia noto il coefficiente, nel passare da una data temperatura ad un'altra più elevata. Analoghe soluzioni si hanno per la determinazione dell'aumento di volume e di superficie.

1. Calcoliamo la lunghezza di una spranga, costituita di una certa sostanza, ad una certa temperatura *t*, nota la lunghezza della spranga stessa, a zero gradi.

Se con α indichiamo il coefficiente di dilatazione del corpo costituente la spranga, con l_0 la lunghezza a zero gradi della spranga mede-

sima e con l_t la lunghezza incognita della stessa spranga a t°, è chiaro che l'aumento in lunghezza, subìto dalla spranga nel passare dalla temperatura di 0° alla temperatura di t°, è espresso dal prodotto $l_o \alpha t$; onde sarà

$$l_t = l_o + l_o \alpha t,$$

e raccogliendo il fattore comune l_o,

$$l_t = l_o (1 + \alpha t). \qquad (1)$$

La quantità entro parentesi ha ricevuto il nome di *binomio di dilatazione lineare.*

Per una spranga di acciaio lunga 30 metri a 0°, si troverebbe coll'uso della formola (1), che la lunghezza da essa assunta a 50°, prendendo per valore del coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio $\alpha = 0{,}0000114$): $l_t = 30\ (1 + 0{,}0000114 \times 50) = 30^m, 0171$.

L'allungamento subìto è di mm. 17,1.

Una variazione di 50° di temperatura si ha frequentemente sulle rotaie ferroviarie dall'inverno all'estate, in conseguenza del riscaldamento dovuto ai raggi solari.

2. Mediante la relazione (1) potremo esprimere, in base alle lunghezze della spranga a 0° e ad s° e al coefficiente di dilatazione lineare, la lunghezza della spranga a t°. Se indichiamo la lunghezza ad s° con l_s, sarà

$$l_s = l_o (1 + \alpha s). \qquad (2)$$

Dividendo membro a membro le due relazioni (1) e (2) si ha:

$$\frac{l_t}{l_s} = \frac{l_o (1 + \alpha t)}{l_o (1 + \alpha s)},$$

ossia

$$\frac{l_t}{l_s} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha s}.$$

Dalla qual relazione si ricava

$$l_t = l_s \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha s}. \qquad (3)$$

3. Per la dilatazione superficiale si opererà analogamente. Se indichiamo con β il coefficiente di dilatazione superficiale e con S_o, S_t, S_r, rispettivamente, la superficie del corpo a o, a t, e ad r gradi di temperatura, si troverebbero le relazioni seguenti:

$$S_t = S_o (1 + \beta t); \qquad S_t = S_r \frac{1 + \beta t}{1 + \beta r}.$$

4. Similmente per la dilatazione cubica. Indicando con γ il coefficiente di dilatazione cubica e rappresentando con V_o, V_t e V_r il volume del corpo, rispettivamente, a 0°, a t° e ad r°, con ragionamenti del tutto analoghi a quelli fatti per la dilatazione lineare, si troverebbero le relazioni:

$$V_t = V_o (1 + \gamma t); \qquad V_t = V_r \frac{1 + \gamma t}{1 + \gamma r}.$$

§ 20. **Variazione della densità con la temperatura.** — Il calore determina la dilatazione dei corpi, ma non l'aumento della loro massa. Così la massa di un corpo a 0° sarà uguale alla massa dello stesso corpo a t°. E se con V_o, d_o, V_t, d_t indichiamo rispettivamente il volume e la densità di un corpo a 0° ed a t°, essendo la massa di un corpo uguale al proprio volume per la densità, potremo scrivere:

$$V_o\, d_o = V_t\, d_t.$$

E ricordando che $V_t = V_o\,(1 + \gamma t)$, si ha, sostituendo:

$$V_o\, d_o = V_o\,(1 + \gamma t)\, d_t,$$

ovvero

$$d_o = (1 + \gamma t)\, d_t,$$

dalla quale:

$$d_t = \frac{d_o}{1 + \gamma t}. \qquad (4)$$

Questa importante relazione ci permette di calcolare il valore della densità di un corpo a t°, nota la densità a 0° e noto il coefficiente di dilatazione cubica della sostanza di cui è costituito il corpo.

La relazione (4) ci permette di scrivere:

$$d_s = \frac{d_o}{1 + \gamma s}, \qquad (5)$$

ove d_s rappresenta la densità del corpo alla temperatura di s°.

Dividendo membro a membro le uguaglianze (4) e (5) si ha:

$$\frac{d_t}{d_s} = \frac{\dfrac{d_o}{1 + \gamma t}}{\dfrac{d_o}{1 + \gamma s}},$$

ossia:

$$\frac{d_t}{d_s} = \frac{d_o\,(1 + \gamma s)}{d_o\,(1 + \gamma t)} = \frac{1 + \gamma s}{1 + \gamma t},$$

dalla quale:

$$d_t = d_s \frac{1 + \gamma s}{1 + \gamma t};$$

relazione che ci esprime il valore della densità di un corpo a t°, nota quella ad s° e noto il coefficiente di dilatazione cubica.

§ 21. **Necessità di tener conto delle dilatazioni.** — Quando un corpo si dilata per riscaldamento, entrano in campo forze della stessa entità di quelle che sarebbero necessarie a produrre identica dilatazione con la trazione. Forze considerevoli quindi, che, nella generalità dei casi pratici, si potranno calcolare, onde tenerne conto per evitare possibili inconvenienti. Abbiamo (§ 19) calcolato l'allungamento di una spranga di rotaia riscaldata dai raggi solari. Supponiamo la sezione di questa spranga uguale a 50 centimetri quadrati. La formola a noi nota, relativa alla *elasticità di trazione* (vol. precedente, pag. 189), ci dice

che per ottenere un allungamento l, bisogna esercitare una trazione P nel senso della lunghezza, data dalla espressione:

$$P = Es\frac{l}{L}.$$

Questa si calcola per il caso della rotaia, dando al coefficiente numerico E il valore 20, che compete all'acciaio delle rotaie e sostituendo ad s la sezione in millimetri quadrati, ad l l'allungamento in millimetri, ad L la lunghezza in metri. P è espresso allora in chilogrammi. Operando le sostituzioni numeriche, si ottiene:

$$P = \frac{20 \times 5000 \times 17}{30} = 56666 \text{ chilogrammi.}$$

È questo praticamente lo sforzo che sarebbe occorso per ottenere, con la trazione, l'allungamento calcolato. Si vede dunque quale spinta enorme avrebbe esercitata la rotaia contro due masse, poste alle estremità per impedirne l'allungamento.

Fig. 18. - Connessioni di tubi metallici atte a preservarli da rotture in conseguenza di dilatazioni per effetti di caldo estivo.

Questo giustifica certe precauzioni che dipendentemente dalle dilatazioni termiche si prendono nella pratica costruttiva ed alle quali accenneremo nel § 22; intanto si osservi, ad esempio, la Fig. 18.

La esperienza rappresentata dalle figure 19 e 20 serve a dimostrare chiaramente l'entità delle forze messe in esercizio nelle variazioni di dimensione, dovute ad azione termica. Tale entità è stata applicata ai vari

Fig. 19. - Apparecchio per mettere in rilievo la forza di contrazione termica. Scaldata la spranga *a* così da farla molto dilatare; messo nell'anello *b* il cilindro di ghisa *g*, e stretta fortemente la madrevite *c* dopo aver posta la spranga su *S* ed *S'*, si ha, per la contrazione dovuta al ritorno della spranga alle condizioni termiche dell'ambiente, lo spezzamento del cilindro *g*.

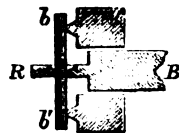



Fig. 20. - Sezione orizzontale della parte destra dell'apparecchio già in azione, rappresentato dalla Fig. 19.

casi per ottenere effetti meccanici cospicui. Così si è riusciti a raddrizzare nel Conservatorio d'Arti e Mestieri a Parigi, nel palazzo del

Parlamento subalpino a Torino ecc., dei muri, che avevano ceduto al peso di una volta, collegando il muro pericolante a quello opposto, mediante una serie di sbarre che li attraversavano, scaldandole a gruppi fortemente, poi lasciandole raffreddare dopo avere stretti all'esterno dei dadi a vite.

Correzioni barometriche. — Si tien conto delle dilatazioni termiche nelle correzioni che debbono farsi alle letture barometriche (vol. prec., pag. 128), riducendole tutte alla temperatura di 0°. Per il barometro Fortin, a scala d'ottone, si dimostra sufficientemente approssimata in pratica la seguente formola, dedotta in modo particolare dalle precedenti: $a = A\,(1 - \delta t)$, nella quale a rappresenta in mm. l'altezza barometrica cercata, A quella letta, t la temperatura e δ la differenza fra il coefficiente di dilatazione assoluta del mercurio (0,000180) e quello di dilatazione lineare dell'ottone (0,0001876), vale a dire il numero (0,00016124).

§ 22. Fenomeni dipendenti dalle dilatazioni dei solidi e applicazioni di queste dilatazioni.

— Le variazioni del volume dei corpi per raffreddamento o per riscaldamento sono state utilizzate e si utilizzano frequentemente in vari casi pratici.

Fig. 21.

Una importante applicazione della dilatazione varia dei diversi corpi è stata fatta nei pendoli da orologio. Pel caldo estivo i pendoli degli orologi si allungano e pel freddo invernale si accorciano, cosicchè viene nel primo caso aumentato e nel secondo accorciato il periodo vibratorio, che è la base della misura del tempo fornitaci dall'orologio.

Per evitare questo inconveniente, che fa avanzare o ritardare l'orologio, si costruiscono i pendoli detti a *compensazione.* Quello di Harrison e Leroy è formato da vari telai contenuti uno dentro l'altro, come mostra la Fig. 21, e fissati fra loro per modo che in conseguenza di una dilatazione i lati verticali di alcuni si allunghino verso il basso, e quelli degli altri si allunghino verso l'alto; la massa pesante del pendolo sentirà insieme la prima azione di abbassamento e la seconda di sollevamento.

Se i lati verticali dei telai sono costruiti per lunghezza e per il materiale che li costituisce in modo tale che l'allungamento verso il basso degli uni sia uguale all'ullungamento verso l'alto degli altri, la massa pesante del pendolo non si sposterà, il che vorrà dire che la lunghezza del pendolo non si modificherà per un riscaldamento dell'ambiente. Ed è chiaro che non si modificherà neppure per un raffreddamento.

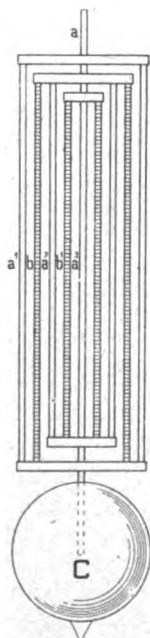
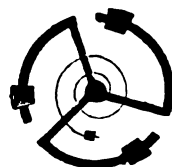



Fig. 22.

A questa disposizione si prestano assai bene il ferro e lo zinco, i cui coefficienti di dilatazione sono nel rapporto di 13 a 31.

Nei cronometri la compensazione si ottiene d'ordinario mediante le così dette *lamine compensatrici* (§ 4).

Con esse si riesce a compensare negli orologi gli allungamenti e gli accorciamenti della spirale regolatrice e gli aumenti e le diminuzioni di diametro del relativo bilanciere al crescere o al diminuire della temperatura, i quali tenderebbero a rallentarne o ad accelerarne il moto col munirne (Fig. 22) il bilanciere stesso di due o tre lamine compensatrici, piegate ad arco, ed aventi all'esterno il metallo più dilatabile: l'aumento (la diminuzione) della temperatura incurvando di più (di meno) le lamine avvicina (allontana) al centro alcune piccole masse pesanti, e così compensa le accennate dilatazioni (contrazioni).

Notevole l'uso delle lamine compensatrici nel termometro metallico del Bréguet (Fig. 23).

Fig. 23. - Termometro del Bréguet, costituito da una spiralina formata con una lamina tripla in platino, oro ed argento. La spiralina è fissa in alto per un estremo e porta in basso all'estremo libero un indice che può scorrere su di un quadrante graduato. Se l'argento, che è il più dilatabile dei tre metalli indicati per ordine crescente di dilatabilità, è nell'interno; ogni aumento di temperatura fa distorcere la spirale, ed ogni diminuzione la fa torcere di più, così che l'indice si muove in un senso o nell'altro secondo che l'apparechio si scalda o si raffredda. È questo un termometro molto pronto perchè la spirale ha piccola massa e partecipa accusandolo subito di ogni cambiamento di temperatura.

In moltissimi casi pratici occorre tener conto della dilatazione termica. Così, nella costruzione delle tettoie metalliche. In esse le lamine non debbono essere inchiodate sulla travatura, perchè non si rompano pel freddo e non si incurvino pel caldo, ma debbono essere incanalate in apposite guide, ove possano scorrere.

Siccome la dilatazione o contrazione dei metalli impiegati nelle costruzioni è differente da quella delle pietre, cementi e legni, è evidente che quelli non debbono essere fissati a questi, ma disposti in modo da potersi allungare e accorciare, senza che esercitino pressione o trazione, altrimenti potrebbero avvenire rotture e spostamenti (Fig. 24).

Nella posa delle rotaie ferroviarie, delle grate dei fornelli, è necessario lasciare un conveniente intervallo fra i diversi pezzi, e fissar questi in modo che possano liberamente variare di lunghezza al variare della temperatura. Per cerchiare di ferro le ruote di legno, si scaldano i cerchi, perchè, dilatandosi, possano adattarsi comodamente alle ruote e contraendosi poi col successivo raffreddamento, ne stringano e ne tengano fortemente uniti i pezzi. Spesso, per non dire sempre, i corpi cattivi conduttori del calore, come il vetro, si rompono quando si scaldano bruscamente, perchè le parti riscaldate, dilatandosi più delle altre, cui il calore si propaga difficilmente, esercitano contro questa una pressione che ne vince la compagine. Per evitare la rottura conviene che il riscaldamento sia lento e generale. Nella esecuzione di esperienze od altro i recipienti di vetro da porre sulla fiamma devono venir riscaldati

Fig. 24. - Parte terminale dei pezzi di un ponte metallico. Non è rigidamente fissata ed ha spazio sufficiente per una dilatazione dovuta al calore della stagione estiva.

dapprima gradatamente, muovendoli in modo che la fiamma ne lambisca tutti i punti, oppure si colloca il recipiente su di una reticella metallica e si scalda questa direttamente con la fiamma. Così il vetro non viene in contatto diretto con la fiamma, mentre la reticella, riscaldandosi ovunque, riscalda a sua volta il vetro su tutta la sua superficie inferiore.

Rotture analoghe avvengono anche per raffreddamenti improvvisi.

Per estrarre i tappi di vetro smerigliato dalla bocca di un recipiente, cui sieno applicati così tenacemente, da resistere alla trazione o ad altro sforzo meccanico, si usa spesso riscaldare leggermente il collo con una fiamma o con lo strofinìo.

Dilatazione dei Liquidi.

§ 23. **Dilatazione dei liquidi: reale ed apparente.** — Dei liquidi si considera la sola dilatazione cubica, però la si distingue in dilatazione apparente ed in dilatazione reale od assoluta secondo che non si tiene o si tien conto della dilatazione dei recipienti nei quali sono contenuti. Corrispondentemente si chiama *coefficiente di dilatazione apparente* l'aumento apparente dell'unità di volume di un liquido in un recipiente, quando la temperatura aumenta di 1°; e *coefficiente di dilatazione reale* od *assoluta* il vero aumento dell'unità di volume di un liquido, quando la sua temperatura aumenta di 1°. Si dimostra che il coefficiente di dilatazione assoluta μ di un liquido è uguale a quello di dilatazione apparente δ, aumentato di quello k di dilatazione del recipiente; cioè che

$$\mu = \delta + k. \qquad (6)$$

Sia V_o il volume a 0° di una massa liquida. Si scaldi il liquido sino a t^o. Il volume dilatato del liquido (se usiamo le suindicate notazioni per i coefficienti) sarà:

$$V_o\,(1 + \mu t) \qquad (7)$$

ed il suo volume apparente:

$$V_o\,(1 + \delta t).$$

Ma siccome ogni unità di volume del recipiente dopo la dilatazione vale $(1 + kt)$, il volume reale del liquido può anche scriversi:

$$V_o\,(1 + \delta t)\,(1 + kt). \qquad (8)$$

Si può allora scrivere la uguaglianza delle espressioni (7) e (8), ossia

$$1 + \mu t = (1 + \delta t)\,(1 + kt). \qquad (9)$$

Effettuando le operazioni, e trascurando il termine $k\delta t$, trascurabile, si ha quindi

$$\mu = \delta + k.$$

Da ciò ne risulta che, una volta noto il coefficiente di dilatazione vera di un liquido qualunque, si può con facilità determinare il coefficiente di dilatazione della sostanza costituente un dato recipiente, deter-

minando in questo la dilatazione apparente di quel liquido, e, noto tale coefficiente, misurare la dilatazione assoluta di un liquido qualunque, del quale si determini la dilatazione apparente in quel medesimo recipiente. In ciò sta l'ordinario metodo di determinazione dei coefficienti di dilatazione dei vari liquidi. Il recipiente che si utilizza riceve il nome di *dilatometro* e verrà descritto più avanti.

§ 24. **Dilatazione assoluta del mercurio - Metodo di Dulong e Petit.** — Il liquido del quale fu per la prima volta noto il coefficiente di dilatazione assoluta, indipendentemente dalla dilatazione del recipiente, fu il mercurio.

Dulong e Petit determinarono tale coefficiente di dilatazione assoluta nel mercurio con un metodo molto semplice ed ingegnoso, che sfuggiva alla perturbazione creata dalla dilatazione del recipiente. Ricordiamoci delle condizioni di equilibrio dei liquidi nei tubi comunicanti. Allorchè in due larghi tubi di vetro (Fig. 25) A e D, che sono in comunicazione per mezzo di un tubo sottile orizzontale BC, si versa un liquido qualunque, perchè le pressioni siano uguali è necessario che le colonne siano allo stesso livello; e se i liquidi dei tubi sono diversi, le altezze delle colonne liquide devono essere inversamente proporzionali alle loro densità. Supponiamo di riempire con mercurio il nostro tubo $ABCD$ e di avere disposto l'apparecchio (Fig. 26) in modo che il liquido di uno dei tubi sia tenuto costantemente alla temperatura di 0°, mentre nell'altro tubo la temperatura possa portarsi a $t°$. È chiaro che, dilatandosi, questo liquido diminuirà di densità, e perchè l'equilibrio sussista dovrà crescere l'altezza della colonna.

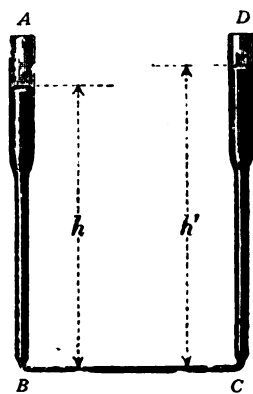
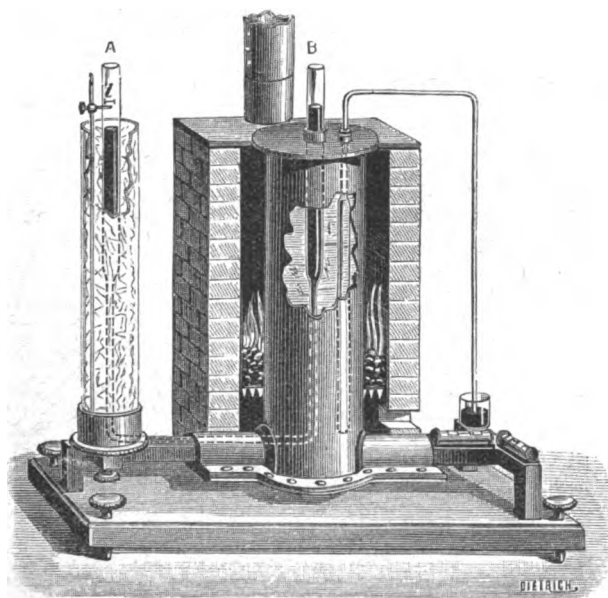



Fig. 25.

Fig. 26.

Dalle lunghezze h ed h' delle due colonne può dedursi immediatamente il coefficiente di dilatazione del mercurio. Difatti indicando con d_o, V_o, d_t e V_t rispettivamente la densità ed il volume del mercurio

della prima colonna, la densità ed il volume del mercurio della seconda, si hanno le relazioni

$$\frac{h}{h'} = \frac{d_t}{d_o} \qquad \frac{d_t}{d_o} = \frac{V_o}{V_t},$$

dalle quali si ricava l'altra:

$$\frac{h}{h'} = \frac{V_o}{V_t},$$

ossia:

$$\frac{h}{h'} = \frac{V_o}{V_o\,(1 + \alpha t)} = \frac{1}{1 + \alpha t},$$

ove α è il coefficiente che si cerca.

Risolvendo rispetto ad α, si trova:

$$\alpha = \frac{h' - h}{ht}.$$

In base a ciò, i fisici Dulong e Petit trovarono che, fra 0° e 100°, il coefficiente medio di dilatazione assoluta del mercurio è 1/5550, ossia 0,000180, il qual valore è quasi uguale a quello ottenuto posteriormente, con procedimento più preciso, dal Regnault, che, fra 0° e 50°, trovò come valor medio $\frac{1}{5547}$.

§ 25. **Dilatazione di un liquido qualsiasi - Metodo del dilatometro e del termometro a peso.** — Il *dilatometro* è un apparecchio in vetro che ha la forma stessa del termometro a mercurio, tranne che il tubo munito di regolari divisioni è aperto.

Una prima nozione da acquistare nell'uso del dilatometro è il rapporto a 0° fra il volume V_o del bulbo ed il volume v di una divisione, mediante la determinazione di V_o e di v.

A questo fine, avendo tarato l'apparecchio con un peso noto, lo si riempie di mercurio sino all'alto del tubo graduato e si determina il suo aumento di peso P. Immergendolo poi nel ghiaccio fondente, si nota il numero n ove è giunto il livello del mercurio nella graduazione unita al tubo contenente il mercurio. Se D è il peso specifico del mercurio a 0° si ha:

$$V_o + nv = \frac{P}{D}.$$

Si toglie poi, per qualche divisione, del mercurio dal tubo. P' ed n' designando quantità analoghe a P e ad n; si ha allora:

$$V_o + n'v = \frac{P'}{D}.$$

Dalle due ultime equazioni scritte, si possono ricavare i valori di V_o e di v.

Si scalda poi l'apparecchio a t^o cosicchè il mercurio si eleva sino alla divisione m. Esprimiamo che a t^o il volume del liquido contenuto è uguale a quello della capacità che lo contiene. Sieno μ e k i coeffi-

cienti di dilatazione del mercurio e del vetro. Il mercurio a 0° ha un volume V_o, che a $t°$ diventa $V_o\ (1 + \mu t)$. La capacità occupata dal mercurio sarebbe $V_o + mv$, se il recipiente non si fosse dilatato; in realtà è divenuta

$$(V_o + mv) \times (1 + kt).$$

Si ha dunque:

$$V_o\ (1 + \mu t) = (V_o + mv)\ (1 + kt),$$

dalla quale si ricava k, se non si preferisce ricavarla dalla equazione medesima, scritta sotto quest'altra forma:

$$n\ (1 + \mu t) = (n + m)\ (1 + kt).$$

Trovato il coefficiente di dilatazione del recipiente, si ricomincia in questo una esperienza analoga alla già eseguita, dopo averlo vuotato e riempito d'un altro liquido, se interessa conoscere il coefficiente x di dilatazione di questo.

Se m' è la divisione alla quale arriva il liquido alla temperatura t', si ha l'equazione:

$$n\ (1 + xt') = (n + m')\ (1 + kt').$$

Il *termometro a peso* consta di un vaso A di vetro (Fig. 27), che può riempirsi di mercurio, il quale può venir sorretto per mezzo di una rete con un manubrio M, e che termina in un collo stretto e piegato in modo che vada a pescare in un vaso vicino B, sostenibile insieme col vaso A. Si pesa il recipiente vuoto e poi pieno di mercurio a 0°; la differenza fra i due pesi è il peso P del mercurio che riempie il recipiente a 0°. Quindi si porta il recipiente alla temperatura T, in conseguenza di che esce del mercurio dalla punta del tubo e cade nel recipiente B. Conoscendo il peso di questo recipiente, si determina facilmente, con una ulteriore pesata, il peso p del mercurio uscito.

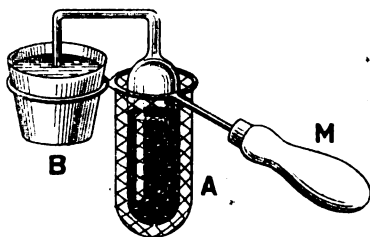



Fig. 27.

Esprimiamo la uguaglianza a $t°$ del contenente e del contenuto; indichiamo con μ e con δ i coefficienti di dilatazione assoluta ed apparente del mercurio, con d e con d' le densità a 0° ed a $t°$. Il volume $\frac{P}{d}$ del mercurio a 0° misura il volume del recipiente a 0°, che diventa

$$\frac{P}{d}\ (1 + kt) \text{ a } t°.$$

Il volume di mercurio contenuto a $t°$ nell'apparecchio sarà

$$\frac{P - p}{d'} = \frac{P}{d}\ (1 + kt);$$

ma essendo

$$\frac{P - p}{d'} = \frac{P - p}{d}\ (1 + \mu t),$$

avremo

$$\frac{P}{d}(1 + kt) = \frac{P - p}{d}(1 + \mu t).$$

Ma siccome (formola 9 del § 23)

$$1 + \mu t = (1 + \delta t)(1 + kt),$$

si ha

$$P = (P - p)(1 + \delta t),$$

da cui

$$\delta = \frac{p}{(P - p)t}.$$

Sottraendo questo coefficiente dal coefficiente di dilatazione assoluta del mercurio ($\mu = \frac{1}{5550}$), si ha il coefficiente di dilatazione k del recipiente, ossia $k = \frac{1}{5550} - \delta$.

Conosciuto il coefficiente di dilatazione del termometro a peso, si può determinare il coefficiente di dilatazione assoluta di un liquido qualunque, col cercare anzitutto il coefficiente di dilatazione apparente δ' del liquido, nel modo indicato per il mercurio ed eseguendo la somma

$$k + \delta'.$$

L'apparecchio più sopra descritto riceve la denominazione di termometro a peso perchè può servire a determinare la temperatura.

Riempito il recipiente A ad una temperatura che si sappia certamente inferiore a quella che si vuol determinare, la si porta nel luogo del quale si vuol conoscere la temperatura e si valuta il peso p' del mercurio uscito. Sarà:

$$\frac{p}{(P - p)t} = \frac{p'}{(P - p')\theta},$$

equazione questa dalla quale si dedurrà θ.

§ 26. **Dilatazione eccezionale dell'acqua.** — L'acqua presenta nella sua dilatazione un fenomeno interessante, che la distingue dagli altri liquidi. Allorchè la temperatura di una data massa si abbassa verso i 4°, il suo volume diminuisce ed aumenta per conseguenza la sua densità; ma se la temperatura continua ancora ad abbassarsi da 4° verso 0°, il suo volume invece cresce e la sua densità diminuisce, cosicchè verso i 4° assume la massima densità. Vi sono varie esperienze che tendono a mostrare questo fatto e a determinare con precisione la temperatura alla quale si ha la massima densità.

Descriviamo l'esperienza immaginata alla stessa epoca da Hope e da Tralles. Attraverso a due fori praticati nella parete laterale di un cilindro di vetro (Fig. 28) si fanno passare per i bulbi due termometri, mantenuti a perfetta tenuta. Nella regione mediana un cilindro metallico circonda il vaso cilindrico. Se si riempie quest'ultimo d'acqua, e

s'introduce nel manicotto del ghiaccio, si nota che la temperatura del termometro inferiore discende lentamente sino a 4° e quivi si ferma: subito dopo comincia a discendere anche la temperatura del termometro superiore e discende fino a 0°. Ciò prova che tanto a temperatura più alta, quanto a temperatura più bassa di 4°, l'acqua si mantiene al disopra di quella a 4°; a questa temperatura essa presenta la massima densità. In modo non dissimile avviene che nel fondo dei laghi, nelle regioni fredde, l'acqua si mantiene costantemente a 4°. Questa proprietà dell'acqua dà la spiegazione del fatto che la temperatura dei laghi è più elevata negli strati d'acqua più profondi, mentre discende più in basso per l'acqua della superficie: infatti, quando questa si raffredda per l'azione refrigerante dell'aria sovrastante, si contrae, si fa più densa e va a fondo, mentre sale alla superficie l'acqua più leggera degli strati inferiori: questa, raffreddandosi a sua volta, ridiscende verso il fondo ed è sostituita da altra acqua ascendente, e lo spostamento continua finchè tutta l'acqua non abbia la temperatura di 4°. Dopo, se persiste o diminuisce la bassa temperatura dell'aria, cessa ogni moto perchè l'acqua superficiale raffreddandosi si dilata e facendosi più leggera non può discendere verso il fondo.

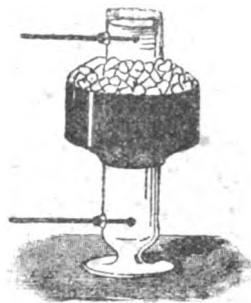



Fig. 28.

Ne segue che l'acqua può congelarsi alla superficie e formare una crosta di ghiaccio, che diventi successivamente più grossa. Nei laghi profondi però questa non giunge mai al fondo, dove si mantiene l'acqua liquida più densa, alla temperatura di circa 4 gradi. Ciò permette la vita e la diffusione degli esseri viventi nei laghi e nei fiumi delle regioni fredde, non opponendosi a questa la esistenza del ghiaccio alla superficie.

In causa della indicata irregolare dilatazione non sono applicabili all'acqua le formole delle dilatazioni, nei limiti entro i quali si usano per gli altri corpi.

Dilatazione dei Gas.

§ 27. **Dilatazione dei gas.** — Il riscaldamento dei gas può avvenire per modo che la pressione loro resti costante e varii il volume, oppure può effettuarsi in guisa che resti costante il loro volume e varii la loro pressione. Si verificano le prime circostanze quando il gas sia riscaldato per modo che possa espandersi liberamente: si verificano le altre quando il gas è contenuto in un recipiente di volume invariabile, nel qual caso l'esperienza prova che il riscaldamento determina un aumento della pressione del gas contro le pareti del recipiente.

Si considerano in corrispondenza due coefficienti, detti di dilatazione, sebbene nel secondo caso non avvenga alcuna dilatazione e si tratti invece di una variazione di pressione.

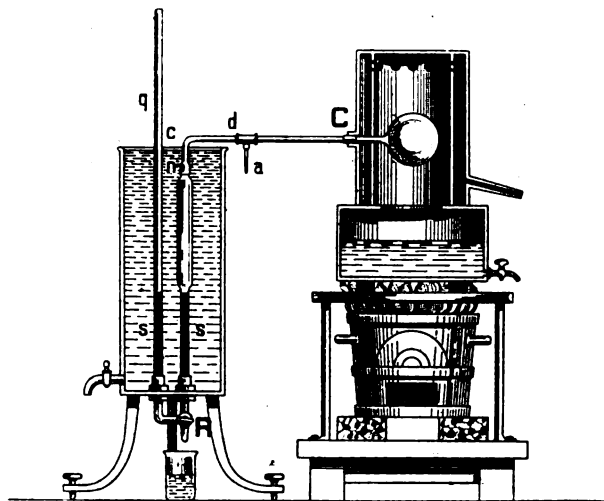
Diremo *coefficiente di dilatazione a pressione costante* l'aumento che subisce nel primo caso l'unità di volume del gas, per l'aumento di un grado di temperatura; mentre diremo *coefficiente di pressione* (o di ten-

sione) *a volume costante* l'accrescimento di pressione che subisce l'unità di volume, per l'aumento di un grado di temperatura.

Si possono misurare questi due coefficienti mediante l'apparecchio ideato dal Regnault per esperienze che più sotto citeremo e consistente (Fig. 29) in un palloncino C (scaldabile in una stufa) comunicante con un manometro ad aria libera, munito in basso di un rubinetto R a tre vie.

Fig. 29.

Si avrà lo studio della dilatazione a pressione costante, se mentre il palloncino (e quindi il gas da esso contenuto) è riscaldato si mantiene (con l'aiuto del rubinetto R) uguale il livello del mercurio nei due rami del manometro.

Si avrà lo studio della dilatazione a volume costante, se, versando opportunamente mercurio nel ramo aperto, si determina il conveniente dislivello di mercurio atto a mantenere inalterati, nonostante il riscaldamento, il volume del gas, di cui il dislivello del mercurio dà la variazione di pressione, corrispondente al determinato aumento di temperatura.

Possiamo intanto notare:

1. Che se indichiamo con α il coefficiente di dilatazione di un gas e con V_o, V_t e V_s i volumi che esso assume a 0° a $t°$ ed a $s°$ si ha:

$$V_t = V_o (1 + \alpha t); \quad V_o = \frac{V_t}{1 + \alpha t}; \quad V_s = V_t \frac{1 + \alpha s}{1 + \alpha t};$$

come per i solidi e per i liquidi, salvo le considerazioni che più sotto si faranno intorno al coefficiente α.

2. Che se indichiamo con α' il coefficiente di tensione di un gas e con P_t e con P_o la pressione del gas a $t°$ ed a 0°, è

$$P_t = P_o (1 + \alpha' t).$$

Questa relazione si suol chiamare *relazione formale* o *legge di Regnault*, salvo le ulteriori indicazioni intorno al valore del coefficiente α'.

§ 28. **Legge di Gay-Lussac.** — Il primo che giunse ad enunciare risultati di una qualche determinatezza sulla vera e propria dilatazione dei gas, cioè sulla dilatazione a pressione costante, fu il fisico francese Gay-Lussac, sebbene altri lo avesse preceduto in ricerche relative a tale argomento.

Dopo avere eseguito molte esperienze, con varii gas (Fig. 30) ed entro differenti limiti di temperatura, Gay-Lussac riassunse i suoi risultati nelle

Fig. 31. - Artificio per fare entrare gas secco nel tubo *A* della Fig. 30. Lo si continua con un tubo *C* contenente materiale essicante attraversato da un filo di ferro, inoltrantesi anche nel tubo *AB* preventivamemte riempito di mercurio. Tenendo il tutto verticalmente, come indica la figura, si può, mediante l'aiuto del filo, far uscire il mercurio ed entrare gas secco. Ci si ferma quando sia rimasta una piccola goccia di mercurio.

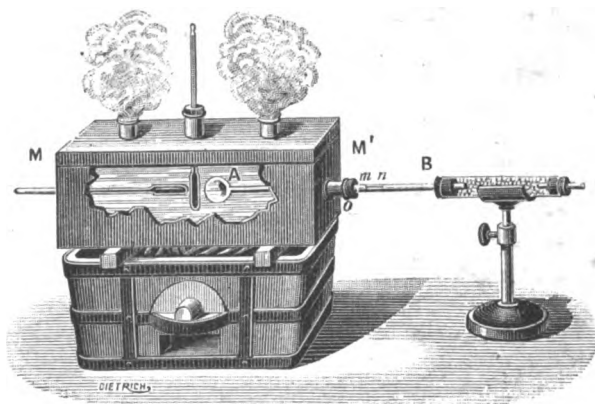



Fig. 30. - Apparecchio di Gay-Lussac per lo studio della dilatazione a pressione costante dei gas. Il gas è contenuto nel palloncino *A* ed è limitato da una goccia *mn* di mercurio.

tre seguenti leggi che portano il suo nome, ma che, come si dirà più sotto, richiedono modificazioni, specialmente per ciò che riguarda il valore del coefficiente di dilatazione, che si ritiene uguale ad $\frac{1}{273}$:

1. Tutti i gas si dilatano ugualmente.
2. La loro dilatazione è indipendente dalla pressione.
3. Il coefficiente di dilatazione comune di tutti i gas fra 0° e 100° è di 0,00375.

Questi risultati si possono e si sogliono riassumere nella relazione già indicata:

$$V_t = V_o (1 + \alpha t),$$

che, riferita ai gas, porta il nome di relazione o anche di *legge del Gay-Lussac* se in essa α è il coefficiente sopra indicato dei gas, considerato uguale per tutti.

I risultati di Gay-Lussac, che coincidevano con quelli già ottenuti dal Davy e che furono confermati da esperienze di Dulong e Petit, furono ritenuti da tutti i fisici per vario tempo esattissimi; e siccome a quei tempi si credeva anche all'esattezza perfetta della legge di Boyle e Mariotte, così si pensò che tutti i gas avessero proprietà fisiche identiche. Questa supposizione fu accettata da tutti, come un principio e considerata come il fondamento di tutte le concezioni teoriche, che si immaginarono sulla costituzione dei gas, fino a che Rudberg (1836) non fece osservare che i gas sui quali aveva operato Gay-Lussac, non erano stati seccati in modo perfetto, il che doveva portare col metodo di misura usato dal Gay-Lussac a risultati imperfetti: e che era necessario ricominciare le esperienze con metodi precisi. Egli trovò difatti che il coefficiente di dilatazione dell'aria per l'intervallo da 0° a 100°, è di 0,003646. Dopo il Rudberg, il Magnus in Germania ed il Regnault in Francia continuarono e completarono (1841-42) questi lavori di revisione: ed è al

secondo che è dovuta la serie più completa di esperienze sulla dilatazione dei gas. Per esse si è potuto riconoscere che nessun gas ubbidisce perfettamente alle leggi di Gay-Lussac, precisamente come avviene per quella di Boyle e di Mariotte. Esse convengono ai gas tanto meglio quanto più questi si trovano lontani dalle condizioni in cui si liquefanno. Perchè è bene fin d'ora tener presente — lo dovremo ampiamente dichiarare in seguito — come tutti i gas si possano liquefare qualora si portino in opportune condizioni di pressione e di temperatura.

§ 29. **Gas perfetto.** — Da ciò che è stato detto nel precedente paragrafo risulta naturale la concezione di un gas ideale, detto *gas perfetto*, pel quale le leggi di Boyle e di Gay-Lussac sieno rigorosamente soddisfatte. Esso si troverebbe come limite di una serie di condizioni, per le quali un gas fosse di più in più lontano delle condizioni necessarie per la liquefazione.

Le due leggi più sopra nominate varrebbero dunque rigorosamente solo per tali condizioni limiti. Si chiamano difatti, tali leggi, *leggi limite*.

Fuse opportunamente in un'unica relazione compendiante, danno tutte le principali proprietà termiche e meccaniche del gas perfetto. Questa relazione costituisce appunto l'*equazione caratteristica del gas perfetto* (§ 31) e tanto meglio potrà applicarsi ai gas reali, quanto più questi sieno lontani della liquefazione.

§ 30. **Risultati del Regnault.** — Ritorniamo al coefficiente di dilatazione α a pressione costante ed al coefficiente di tensione che rappresenteremo con α'. I migliori risultati ottenuti dalle misure di Regnault condussero alle conclusioni seguenti:

1. I gas molto difficilmente liquefacibili hanno sensibilmente lo stesso coefficiente di dilatazione: $\alpha = 0{,}00367 = \frac{1}{273}$.

2. Per gli altri gas, il coefficiente è variabile e superiore al precedente; tanto più grande, quanto più il gas è facilmente liquefacibile.

3. Il coefficiente di pressione α' è sempre vicinissimo per valore ad α, ma sempre più piccolo.

4. I due coefficienti α ed α' aumentano colla pressione.

Nelle applicazioni si confonde α con α' e si suppone che il valore di α sia lo stesso per tutti i gas ed uguale ad $\frac{1}{273}$, valore che è anche attribuito al coefficiente di dilatazione del gas perfetto.

§ 31. **Equazione caratteristica del gas perfetto.** — Allora se V_o, V e V' sono i volumi di una medesima massa di gas a 0°, a $t°$ ed a $t'°$, P_o, P_t e P_t' le pressioni corrispondenti, combinando opportunamente la legge di Gay-Lussac con quella di Boyle, si può giungere alle seguenti uguaglianze:

$$\frac{VP}{1+\alpha t} = \frac{V'P'}{1+\alpha t'} = V_o P_o = \text{costante},$$

le quali costituiscono altrettante forme equivalenti della *equazione caratteristica dei gas*.

§ 32. **Lo zero assoluto.** — Queste relazioni permettono di definire lo *zero assoluto di temperatura*, la temperatura cioè di un corpo, o meglio di un gas, privo affatto di calore. Siccome si suppone che la pressione dei gas contro le pareti dei vasi che li contengono, sia dovuta agli urti delle loro molecole in moto continuo ed incessante, con velocità tanto maggiore quanto maggiore sia la quantità di calore posseduta dal corpo, un gas si riterrà privo affatto di calore e quindi alla temperatura dello zero assoluto, quando sia nulla la sua pressione. Orbene, dalle ultime relazioni scritte, si può ricavare la seguente:

$$VP = V_o P_o (1 + \alpha t), \qquad (10)$$

la quale chiaramente dice essere P uguale allo zero per $(1 + \alpha t)$ uguale allo zero, cioè per $t = - \frac{1}{\alpha} = - 273°$. Così lo zero assoluto corrisponde a $- 273°$ centigradi.

§ 33. **Altra forma della equazione caratteristica.** — Se si rappresenta, come già si disse di fare, con T la temperatura contata a partire da tale zero, l'ultima formola scritta si può scrivere ancora:

$$VP = V_o P_o \alpha T.$$

e, rappresentando con R il prodotto costante $V_o P_o \alpha$,

$$VP = RT. \qquad (11)$$

Questa è la forma più semplice della equazione caratteristica dei gas. Essa dice che col crescere della temperatura assoluta del gas, cresce in proporzione il prodotto del volume per la pressione del gas medesimo.

§ 34. **Termometro ad aria.** — Il dispositivo di Regnault (Fig. 29), più o meno semplificato o modificato (Fig. 32), può servire, e serve, date le buone qualità termometriche dei gas, alla misura delle temperature; sia che lo si adoperi come per lo studio dei gas a pressione costante, sia che lo si adoperi come per lo studio a volume costante. Conoscendo difatti le leggi della variazione di volume dei gas colla temperatura o della variazione di pressione colla temperatura, si può ricondurre la determinazione di quest'ultimo elemento ad una determinazione di volume o di pressione. Ordinariamente si opera una determinazione di pressione ed il gas che si adopera è l'aria.

Il termometro a gas o ad aria si usa di solito soltanto per determinazioni scientifiche di qualche rigore.

§ 35. **Riduzione del volume di un gas a 0° ed alla pressione normale di 760 mm.** — La equazione (10) del gas perfetto ci dà evidentemente il volume V_o di un gas, soggetto alla pressione di 760 mm., in funzione del volume V alla temperatura t e sotto la pressione H, della temperatura t e della pressione H, oltre che del coefficente α di dilatazione dei gas:

$$V_o = \frac{VH}{760 (1 + \alpha t)}. \qquad (12)$$

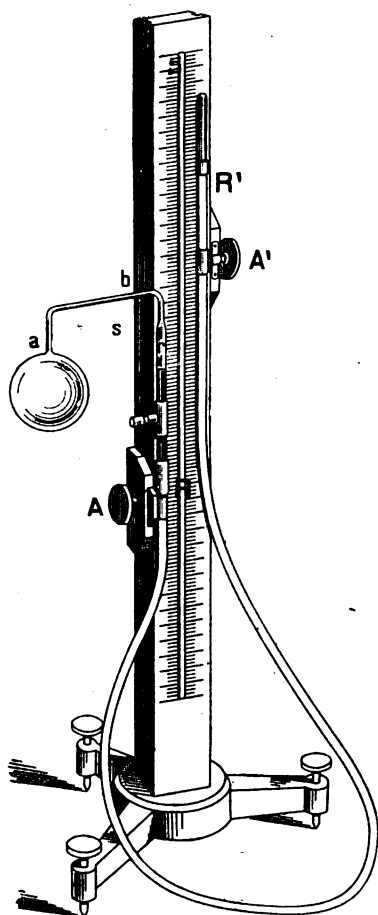



Fig. 32.

§ 36. **Peso (P) di un volume dato (V) di un gas in condizioni determinate di temperatura (t) e di pressione (H).** — Se d è la densità relativa del gas e P' il peso di un volume V di aria, preso nelle medesime condizioni, sarà, per la definizione di densità,

$$P = dP'.$$

Valutiamo P': siano a_o il peso dell'unità di volume d'aria a 0° e sotto la pressione normale, e V_o il volume occupato dal peso P' di aria, alla temperatura di 0° e alla pressione di 760 mm. Si ha:

$$P' = V_o a_o$$

e, per la (12) del paragrafo precedente,

$$P' = a_o \frac{VH}{760\,(1 + \alpha t)}.$$

L'espressione cercata di P sarà quindi:

$$P = da_o \frac{VH}{760\,(1 + \alpha t)}. \qquad (13)$$

Per un litro di aria (giacchè un litro di questa a 0° e a 760 mm. di pressione pesa gr. 1,293) si avrebbe:

$$P = 1{,}293 \frac{H}{760\,(1 + \alpha t)}.$$

CAPITOLO III.

LA FUSIONE E LA SOLIDIFICAZIONE.

§ 37. I corpi solidi, i liquidi, gli aeriformi possono cambiare il loro stato fisico in conseguenza di sottrazione o di cessione ad essi di calore. Dallo stato solido al liquido si passa per *fusione*, dal liquido al solido per *solidificazione*, dal liquido all'aeriforme per *vaporizzazione*. Può anche venire direttamente il passaggio di un solido allo stato aeriforme (canfora ecc.) ed il passaggio di un aeriforme allo stato solido (vapore di zolfo in fiori di zolfo). L'uno e l'altro di

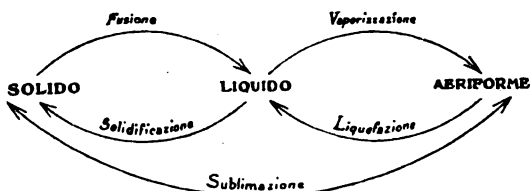



Fig. 33.

questi cambiamenti si chiamano *sublimazione*. (Vedi il prospetto riassuntivo della Fig. 33).

§ 38. **Variazioni di volume corrispondenti alla fusione ed alla solidificazione.** — In generale, durante la fusione, i corpi aumentano di volume, mentre avviene il contrario durante la solidificazione. L'acqua e pochi altri corpi, come la ghisa, fanno eccezione, perchè si comportano oppostamente.

Il ghiaccio esercita quindi degli sforzi considerevoli sui vasi nei quali si forma, donde la frequente rottura dei tubi di conduttura delle acque nell'inverno; ed in primavera la distruzione, per effetto del gelo, dei giovani tessuti vegetali. Le pietre da costruzione possono fendersi, in causa della congelazione dell'acqua di cui sono imbevute.

In causa del comportamento suo nella solidificazione la ghisa è sostanza adatta in modo particolare al modellamento, giacchè la dilatazione che subisce nel solidificare la obbliga a riempire completamente tutti i dettagli degli stampi. È considerevole la dilatazione che subisce l'acqua nel congelare: è circa 1/14, del proprio volume. Ed è anche notevole la forza meccanica che l'accompagna. Se si riempie d'acqua un robusto tubo di ferro fuso e lo si chiude ermeticamente con un tappo a vite, ponendolo poi in un miscuglio refrigerante di ghiaccio e sale, dopo qualche tempo l'acqua si congela e per questo si udirà un rumore abbastanza intenso dovuto al fatto che il tubo stesso, per la dilatazione subìta dall'acqua, si rompe. Questa rottura potrà anche constatarsi col semplice esame della superficie esteriore del tubo.

L'esperienza eseguita dal maggiore Williams a Quebec mostra anche meglio la forza espansiva che si sviluppa nella congelazione dell'acqua.

Fig. 34. - Esperienza del maggiore Williams.

Il Williams riempì d'acqua una bomba di 30 cm. di diametro e la chiuse ermeticamente con un tappo di legno, introdotto a colpi di martello. La bomba venne esposta all'esterno dove la temperatura era di - 28°. L'acqua si congelò ed il tappo venne lanciato ad una distanza di più che 100 metri; contemporaneamente uscì dalla bomba una specie di cilindro di ghiaccio, di circa 20 cm. di lunghezza. In un'altra esperienza la bomba si spaccò tutt'intorno, lasciando uscire una lamina di ghiaccio per l'intera estensione della spaccatura (Fig. 34). Alla proprietà dell'acqua, di espandersi nel solidificarsi, è connessa quella che ha il ghiaccio di galleggiare sull'acqua e alla proprietà stessa son legati i molti accidenti che capitano nell'inverno.

§ 39. **Fusione brusca.** — La fusione di un solido può prodursi in modo franco e deciso, come avviene per il piombo, per il fosforo e per moltissimi altri corpi. La si chiama *fusione brusca*.

§ 40. **Fusione pastosa.** — Ma può anche succedere che il passaggio dallo stato solido allo stato liquido avvenga attraverso ad una serie di stati successivi, nei quali il corpo ha perduto la consistenza e l'elasticità del solido, senza avere ancora raggiunto la mobilità del liquido. In questa condizione intermedia il corpo, che non è più solido e non è ancora liquido, si presenta sotto l'aspetto di una pasta più o meno vischiosa.

E la fusione in questo caso prende il nome di *fusione pastosa*. È presentata da vari corpi, come la cera, il vetro, il ferro. La si utilizza per piegare un tubo di vetro, o, in genere, per lavorare il vetro.

§ 41. **Solidificazione brusca e pastosa.** — Ciò che si è detto sul conto della fusione, in riguardo alla possibilità per essa di esser brusca o pastosa, può ripetersi per il cambiamento di stato, inverso alla fusione, detto solidificazione. Questa pure è per certi corpi brusca e per altri pastosa. E la cosa si comprende se si pensa che un liquido, in quanto può supporsi derivato dalla fusione di un solido, deve, solidificandosi, ripassare, in generale, in senso inverso per la stessa serie di condizioni verificatesi nella fusione.

§ 42. **Analogie nella manifestazione della fusione e della solidificazione brusche.** — Noi non ci occuperemo che della modalità del fenomeno offerto dalla fusiune brusca, abbinandola nel nostro studio a quella della solidificazione brusca, che ne è il fenomeno esattamente opposto, ed è quindi dotato di caratteri perfettamente analoghi ai caratteri di quello. Di ciò facilmente ci si può convincere subito, enunciando quelle proposizioni che costituiscono la prima legge della fusione e della solidificazione (d'ora in poi ometteremo l'aggettivo «brusca»).

a) Ogni corpo fonde ad una temperatura determinata e per esso caratteristica, detta temperatura di fusione.

L'acqua (ghiaccio) fonde alla temperatura di 0°, sempre, se la pressione atmosferica è di 76 centimetri.

a) Ogni corpo solidifica ad una temperatura determinata e per esso caratteristica, detta temperatura di solidificazione.

L'acqua (liquido) solidifica alla temperatura di 0°, sempre, se la pressione atmosferica è di 76 centimetri.

b) La temperatura di fusione di un corpo coincide con quella di solidificazione.

Così il ghiaccio fonde a 0° e l'acqua solidifica a 0°. La temperatura di fusione si chiama *temperatura di equilibrio fra lo stato solido e lo stato liquido*, perchè è l'unica temperatura alla quale possano coesistere (sotto l'ordinaria pressione) i due stati solido e liquido di un medesimo corpo.

Anzi, finchè coesistono i due stati solido e liquido di un corpo, in un determinato ambiente, ivi si avrà sempre la temperatura di fusione o di solidificazione del corpo, comunque si comunichi al sistema o da esso si sottragga del calore. Perchè il calore che si comunichi o che si sottragga farà soltanto o fondere parte del solido o solidificare parte del liquido. In altre parole possiamo dire che:

c) Durante la fusione o durante la solidificazione, la temperatura del corpo che subisce il cambiamento di stato rimane inalterata. Ce ne

possiamo facilmente convincere, ponendo un termometro in un recipiente nel quale si trovi un corpo, come il ghiaccio, in fusione.

È appunto in base a tal fatto che si prende la temperatura del ghiaccio fondente, come punto di partenza nella graduazione del termometro. Si potrebbe, del resto, prendere (se non fosse già largamente diffusa la convenzione suggerita da buone ragioni pratiche) come zero della scala, la temperatura di fusione di un altro corpo. La circostanza per la quale, continuando a scaldare un corpo in fusione, la temperatura sua rimane invariata, porta a pensare che il calore fornito al corpo vada tutto speso a produrre il cambiamento di stato.

A parità di massa, per fondere senza innalzamento di temperatura, tutti i corpi richiedono quantità di calore diverse.

Si chiama *calore di fusione* di un corpo la quantità di calore necessaria per fondere un grammo di questo corpo, senza cambiarne la temperatura.

Siccome l'unità di misura della quantità di calore è la *calorìa*, il calore di fusione è espresso in calorìe. Il calore di fusione del ghiaccio è di calorìe 79,25.

Non è male conoscere la temperatura di fusione e di solidificazione di alcuni corpi (sotto la pressione atmosferica):

Mercurio	−39°,5	Stagno	235°
Acqua	0°	Piombo	335°
Benzólo	5°,5	Argento	1000°
Fosforo	44°	Rame	1050°
Acido stearico	70°	Oro	1250°
Lega Darcet	95°	Ferro	1500°
Zolfo	114°,5	Platino	1775°

La temperatura di fusione e di solidificazione di un corpo, cambia di valore se su questo vengono a gravare pressioni diverse dalla ordinaria pressione atmosferica.

Se ci riferiamo, ad esempio, all'acqua, si trova che a pressioni via via crescenti oltre la pressione atmosferica, la temperatura sua di solidificazione, o di fusione diventa di più in più piccola.

La cosa apparisce naturale se si pensa che l'acqua diminuisce di volume nel passare dallo stato solido allo stato liquido, e che la pressione, aiutando tale diminuzione di volume, fa risparmiare parte dell'azione calorifica, così da non richiedersi più, per la fusione, una elevazione della temperatura sino al valore occorrente a pressione ordinaria.

In generale succede appunto che:

d) Per i corpi che nel passare dallo stato solido allo stato liquido diminuiscono di volume, un aumento di pressione abbassa la temperatura di fusione o di solidificazione. Per i corpi invece — e sono i più — che nel passare dallo stato solido al liquido aumentano di volume avviene l'opposto; un aumento cioè di pressione fa innalzare la temperatura di fusione o di solidificazione.

Per ottenere colla variazione di pressione spostamenti sensibili della temperatura di fusione, occorre far intervenire variazioni molto marcate.

Così, ad esempio, occorre comprimere il ghiaccio a 13 atmosfere per farlo fondere a 0°,1. Ne segue che le variazioni naturali della pressione atmosferica sono senza influenza apprezzabile.

§ 43. **Leggi della fusione e della solidificazione.** — A proposito della fusione e della solidificazione possiamo raccogliere in forma succinta le leggi che governano i due fenomeni opposti.

Prima legge. Ogni corpo soggetto alla pressione atmosferica ordinaria fonde e solidifica ad una stessa temperatura, determinata e per esso caratteristica, detta temperatura di fusione o di solidificazione.

Seconda legge. La temperatura del corpo che subisce il cambiamento di stato, rimane, durante il fenomeno, inalterata, comunque si comunichi ad esso o da esso si sottragga calore.

Terza legge. Un aumento di pressione su di un corpo ne abbassa o ne eleva la temperatura di fusione o di solidificazione, a seconda che il corpo, nel passare dallo stato solido al liquido, diminuisce od aumenta di volume.

§ 44. **Rigelo.** — Il fatto indicato, dell'abbassamento della temperatura alla quale il ghiaccio fonde, per aumento di pressione, dà ragione di molti fatti naturali o di esperienze che complessivamente si attribuiscono al così detto *rigelo*. Graziosa è l'esperienza di Tyndall. Sopra un blocco di ghiaccio (Fig. 35) si pone a cavalcioni un filo di ferro, teso da due pesi uguali. Il filo penetra a poco a poco nel blocco e sembra dividerlo in due parti; ma allorchè il filo ha completamente traversato il blocco, questo risulta intatto e quasi manca ogni traccia del passaggio del filo. D'altronde, seguendo l'esperienza, si constata che il taglio, formato dal filo, si riempie d'acqua che subito congela. Sotto la pressione del filo, difatti, il ghiaccio a 0° fonde (il suo punto di fusione essendo sottoposto a pressione, al disotto di 0°). L'acqua di fusione che si trova un po' al disotto di 0°, solidifica non appena cessa di essere soggetta alla pressione del filo.

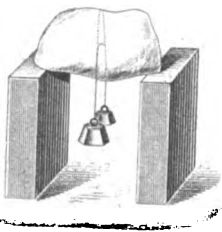
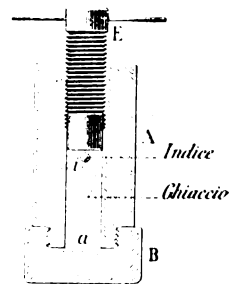



Fig. 35. - Esperienza di rigelo. Sotto la pressione del filo di ferro il ghiaccio fonde, l'acqua di fusione passa al disopra del filo e congela di nuovo.

Un fatto analogo si verifica nell'esperienza della Fig. 36. Frammenti di ghiaccio con sopra una sferetta metallica, compressi che siano, formano un blocco trasparente ed uniforme. La sferetta scende al fondo, indizio del passaggio allo stato liquido del corpo.

Fig. 36.

Al rigelo, cioè al fatto della fusione per azione comprimente ed a quello successivo della solidificazione per cessata compressione, Tyndall attribuisce la plasticità apparente del ghiaccio, per cui si possono formare facilmente lenti di ghiaccio e per cui i ghiacciai seguono lentamente il loro letto, adattandosi a tutte le accidentalità del terreno.

Si sa in che cosa consistano i ghiacciai e come essi si muovano

lentamente da monte a valle. Orbene, quale è la causa o quali le cause di questo movimento? Nè più ne meno che la gravità, accompagnata dalla proprietà del ghiaccio di fondere a temperature via via più basse, al crescere della pressione, ed ecco in che modo. I ghiacciai, com'è noto, si formano nelle parti più elevate di tutte le maggiori valli delle grandi catene montuose del globo. Consideriamo il ghiacciaio in posizione, ove, le pareti opposte della valle siano molto avvicinate, in modo che la valle stessa appaia in quel luogo come strozzata. La pressione grandissima che gravita su quella parte del ghiaccio che tocca le rocce opposte fa abbassare la temperatura di fusione del ghiaccio, il quale fonde; tutto il ghiacciaio può così scendere, mentre passa l'acqua formatasi, la quale poi, appena sottratta alla pressione che l'aveva prodotta, solidifica di nuovo.

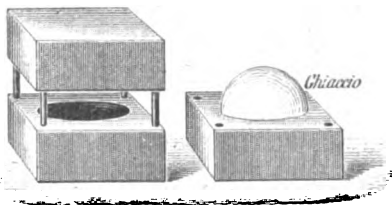



Fig. 37.

Su questa causa, del moto progressivo dei ghiacciai, richiamiamo in modo speciale l'attenzione del lettore, perchè in molti testi di geografia fisica, anche recenti, si insiste ancora nell'attribuire il moto alla plasticità del ghiaccio. Il ghiaccio è un corpo duro, del quale non si può cambiar la forma, altro che rompendolo o fondendolo.

§ 45. **Ritardo alla solidificazione - Surfusione.** — Se si prende dell'acqua liquida ad una temperatura superiore a 0° e la si raffredda lentamente, evitando le scosse e soprattutto il contatto colla più piccola particella di ghiaccio, si constata che la sua temperatura può venire abbassata al di sotto di 0°, senza che congeli. Se l'acqua è in un recipiente privo d'aria, si può, operando colla massima cautela, scendere sino verso a - 30°.

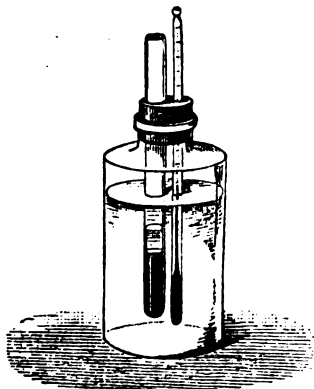



Fig. 38. - Soprafusione del fosforo. Il fosforo contenuto nella provetta rimane fuso sebbene la temperatura sia al disotto della sua temperatura di solidificazione.

Come l'acqua, anche altri corpi presentano il fenomeno indicato, detto di *surfusione.* Il liquido in condizioni di soprafusione, epperò chiamato soprafuso, è in uno stato di falso equilibrio, perchè basta la caduta nel liquido di un piccolo cristallo del corpo soprafuso, od anche una scossa (che certamente produrrà la caduta di un qualche piccolo cristallo aderente alla parete asciutta del recipiente), perchè immediatamente si abbia la solidificazione, con corrispondente elevazione di temperatura sino al punto richiesto dalla fusione.

Va notato, perchè più sopra accennammo alla perfetta corrispondenza fra i fenomeni della fusione e della solidificazione, come la eccezione costituente la surfusione non trovi per ora una eccezione analoga nella prima legge della fusione. Finora non è stato mai osservato il ritardo alla fusione.

§ 46. **Le sostanze refrattarie ed i corpi dissociabili.** — Sembrano costituire eccezione a quanto si è detto sulla possibilità di far passare un solido allo stato liquido od aeriforme, per azione del calore, quelle sostanze che nell'industria si dicono *refrattarie* (calce, magnesia ecc.), perchè impassibili alle temperature più elevate dei fornelli da officina. Va notato però come siffatti corpi arrivino a fondere od a vaporizzare, allorchè si assoggettino a temperature più elevate, quali quelle dell'arco elettrico (3500°).

Altri corpi, per azione del calore, invece di fondere si *dissociano* in corpi a costituzione meno complessa. Così il calcare si dissocia in calce ed anidride carbonica. È questo anzi il processo usato per ottenere la calce.

CAPITOLO IV.

LE SOLUZIONI.

§ 47. **Dissoluzione.** — Si suole associare allo studio della fusione quello di un altro fatto, del quale già parlammo nel precedente volume (§ 219 e seguenti), chiamato *dissoluzione* e dovuto ad una importante proprietà dei liquidi, per la quale essi sembrano determinare un particolare passaggio allo stato liquido di un solido che in essi si immerga.

Il solido però, in siffatto passaggio, non rimane isolato, ma si incorpora necessariamente al liquido. È un passaggio dallo stato solido allo stato liquido per il contatto di un corpo liquido, al quale il solido viene così a mescolarsi omogeneamente, per formare quella che si chiama la *soluzione*.

§ 48. **Congelamento di una soluzione - Legge di Raoult.** — Degno di particolare considerazione è il congelamento di una soluzione, che si manifesta colla solidificazione del solvente puro e con la contemporanea separazione di esso dal corpo disciolto. La temperatura di solidificazione di una soluzione è sempre inferiore alla temperatura di solidificazione del solvente puro, cosicchè, sciogliendo un solido in un liquido, si determina un abbassamento nella temperatura di solidificazione; abbassamento che cresce con la concentrazione della soluzione. *Per le soluzioni diluite l'abbassamento della temperatura di congelazione è proporzionale alla concentrazione* (Legge enunciata da Blagden nel 1788). *La grammo-molecola d'un corpo qualsiasi, disciolto in una medesima quantità e qualità di solvente, determina sempre lo stesso abbassamento del punto di congelazione* (Legge di Raoult).

L'abbassamento prodotto dalla soluzione di *una grammo-molecola* di sostanza in *un grammo* di solvente si chiama *abbassamento molecolare del solvente*. Se si rappresenta questo abbassamento con K, il peso molecolare del corpo disciolto con M, la concentrazione della soluzione con c e l'abbassamento prodotto nella soluzione con Δ, si può scrivere:

$$K = \frac{M}{c}\,\Delta. \qquad (14)$$

Questa formola serve ai chimici per determinare il peso molecolare M di una sostanza, una volta noto l'abbassamento Δ osservato per una soluzione di concentrazione c; l'abbassamento molecolare K è costante per uno stesso solvente, quindi costituisce un dato fisso.

Indichiamo per qualche corpo il valore di K; i fisici si riferiscono sempre a *un grammo* di solvente; i chimici a *cento grammi*; cosicchè il valore di K, nelle loro tavole, risulta la centesima parte di quello qui riportato:

$K = 5100$ per il benzólo
1850 » l'acqua
3860 » l'acido acetico.

Osservazione. Le soluzioni delle quali si può dire che seguono la legge indicata dal Raoult sono quelle non suscettibili di essere attraversate dalla corrente elettrica. Per le soluzioni attraversabili dalla corrente, o come si dice *elettrolitiche,* si hanno abbassamenti superiori a quelli contemplati dalla legge nella sua espressione algebrica.

§ 49. **Punto di eutessia o crioidrato.** — Si sa che la proporzione di solido che una determinata quantità di liquido può tenere in dissoluzione è variabile col variare della temperatura, come può rappresentarsi mediante un diagramma, quale è quello della Fig. 39, nella quale lungo l'asse delle ascisse si rappresentano le temperature e lungo quello delle ordinate i coefficienti di solubilità. Ne segue che se si abbandona a sè stessa una soluzione satura e calda di un corpo più solubile a caldo che a freddo o in generale se si raffredda una soluzione satura, il raffreddamento avrà per effetto di diminuire gradualmente la quantità di materia che può rimanere disciolta: l'eccesso si depositerà, generalmente allo stato solido.

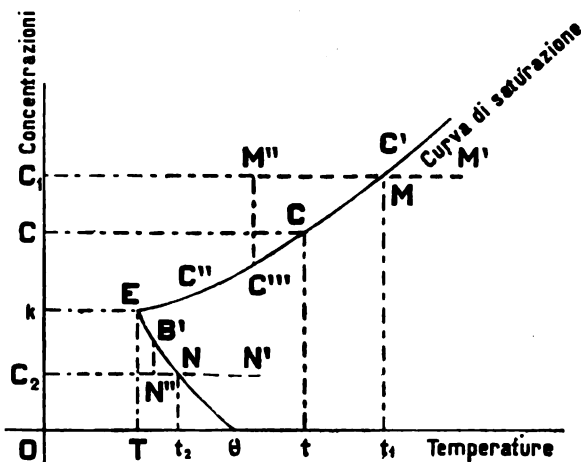



Fig. 39.

La soluzione diminuisce quindi di concentrazione; la curva di saturazione verrà descritta dal punto rappresentativo nel senso CC''. Si constata che per una certa temperatura, prima che tutto il solido disciolto si sia gradatamente depositato, la soluzione congela bruscamente. La temperatura T, alla quale si produce questa congelazione, viene detta punto di *eutessia* o *crioidrato.*

§ 50. **Soprasaturazione.** — Qualche volta può succedere che questa separazione del corpo solido, considerata nel precedente paragrafo, non avvenga. La soluzione in questo stato particolare in cui il

liquido viene a contenere disciolta una maggiore quantità di corpo solido di quella che nelle condizioni in cui si trova potrebbe sciogliere direttamente, si dice *soprasatura*. Per ottenere una soluzione soprasatura occorrono molte precauzioni e principalmente, durante il raffreddamento, bisogna evitare ogni scossa e soprattutto il contatto fra la soluzione e particelle anche piccole del solido che tiene disciolto. Le medesime precauzioni poi si debbono usare anche dopo raffreddata, altrimenti si separa (allo stato cristallino) l'eccesso del corpo disciolto.

§ 51. **Miscele frigorifere.** — La dissoluzione è accompagnata da un assorbimento di calore. Così sciogliendo un solido in un liquido, senz'altro, del calore vien sottratto alla soluzione e la temperatura di questa si abbassa. Si utilizza tale assorbimento di calore nelle così dette *miscele frigorifere*, che possono essere di varia costituzione. Si abbassa, ad esempio, di 26° la temperatura, sciogliendo del nitrato d'ammonio in un ugual peso d'acqua, a temperatura ordinaria.

Alcune miscele sono costituite da solidi, la cui mescolanza ne provoca la reciproca fusione. Ghiaccio e sale comune formano, come è noto, una miscela di tal genere, largamente usata anche per gli usi di cucina. Essa determina un abbassamento di temperatura di circa 20°.

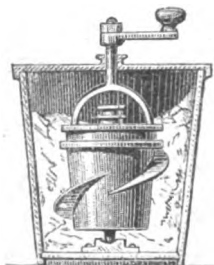



Fig. 40. - Una gelatiera domestica.

Ecco la descrizione d'una gelatiera domestica che utilizza le miscele frigorifere. Essa si compone di un secchio di legno nel quale si colloca il miscuglio refrigerante; l'acqua da congelarsi riempie un vaso di ferro stagnato, chiuso da un turacciolo a vite che riposa sul fondo del secchio per mezzo di un pernio (Fig. 40). Una manovella, che si gira a mano, permette di agitare costantemente il miscuglio; l'agitazione è facilitata da una lama a spirale, che contorna il vaso metallico. Questo apparecchio dà 500 grammi di ghiaccio in un quarto d'ora. Il quadro seguente indica la composizione di qualche miscuglio refrigerante, in uso nei laboratori.

Composizione del miscuglio	Raffreddamento prodotto
1 parte sale marino, 2 parti ghiaccio pesto	+ 0° a — 18°
1 parte acqua, 1 parte nitrato d'ammonio	+ 10° a — 16°
8 parti solfato di sodio, 5 parti acido cloridrico. . .	+ 10° a — 17°
4 parti cloruro di calcio, 3 parti di ghiaccio pesto .	+ 0° a — 50°

§ 52. **Cristallizzazione.** — La separazione allo stato solido di un corpo disciolto, considerato nei §§ 48 e 49, avviene sempre allo stato cristallino. Il corpo cristallizza così per evaporazione del solvente. Infatti con l'evaporazione aumenta la concentrazione della soluzione, che divenendo satura dà luogo al deposito del corpo disciolto.

La cristallizzazione, ottenuta in questo modo chiamasi anche *per via umida*; il liquido da cui si sono separati i cristalli dicesi *acqua madre.*

Si ottengono i solidi cristallizzati anche in altro modo: facendo fondere il solido e poi lasciandolo lentamente raffreddare. Così se si fa fondere zolfo in un crogiuolo e poi lo si lascia raffreddare, finchè la sua superficie sia coperta da una crosta solida, rompendo questa e versando lo

zolfo ancora liquido, si possono osservare sulle pareti del recipiente tanti aghetti di zolfo cristallizzato. Questo processo di cristallizzazione è detto *per via secca* o *per fusione*. Va però notato che la solidificazione pastosa non dà cristallizzazione. Tale è il caso delle resine, del vetro ecc.

Altro processo è quello per sublimazione, cioè per diretto passaggio dallo stato di vapore allo stato solido. Di esso diremo più avanti, nel § 85.

Ogni sostanza nel cristallizzare assume una determinata forma cristallina, la quale costituisce un carattere distintivo d'un corpo.

Le forme cristalline sono assai numerose: però esse si possono classificare in sei *grandi gruppi*, che si dicono *sistemi cristallini*.

Un corpo che non ha forma cristallina, si dice *amorfo*.

Nella difficoltà, già messa in rilievo, d'una definizione completa e precisa dei vari stati d'aggregazione della materia, sembrerebbe atto a rappresentare la stato solido solo il corpo a costituzione cristallina. Ma questo modo di vedere è alquanto perturbato dalla circostanza che da non molto si è messo in rilievo la esistenza di sostanze fluide o semifluide, aventi certune delle proprietà caratteristiche dello stato cristallino. Sono i così detti *cristalli liquidi*.

Piani ed assi di simmetria nei cristalli. — La regolarità di forma dei cristalli è legata alla esistenza di uno o di più piani di simmetria, di uno o più assi di simmetria. Si chiama *piano di simmetria* quel piano rispetto a cui le parti del cristallo si trovano disposte a due a due, come un oggetto e la sua immagine rispetto ad una superficie piana speculare. Si chiama *asse di un cristallo* la retta che unisce i punti medi delle facce opposte o degli spigoli opposti, oppure i vertici opposti; esso risulta, in generale, dalla intersezione di due o più piani di simmetria.

Sistemi cristallini. — Le forme cristalline son svariatissime. Si possono raggruppare in sei tipi o *sistemi cristallini*, ciascuno dei quali è caratterizzato da un certo numero di assi detti *principali*, dal numero e dalla posizione dei piani di simmetria, ed ha una forma detta *fondamentale*, cui possono riferirsi tutte le altre. Questi sei tipi sono i seguenti:

1. Sistema monometrico. Forma fondamentale: *il cubo*. Piani di simmetria: nove. Assi principali: tre, uguali ed ortogonali.

2. Sistema dimetrico esagonale. Forma fondamentale: *prisma esagonale*. Piani di simmetria: sette. Assi principali: quattro, di cui tre in uno stesso piano, uguali fra di loro e formanti un angolo di 60°; il terzo perpendicolare agli altri tre.

3. Sistema dimetrico tetragonale. Forma fondamentale: *prisma retto a base quadrata*. Piani di simmetria: cinque. Assi principali: tre di cui due ortogonali, uguali fra di loro e il terzo perpendicolare agli altri due.

4. Sistema trimetrico ortogonale od ortorombico. Forma fondamentale: *prisma retto a base rombica*. Piani di simmetria: tre. Assi principali: tre, ortogonali, disuguali.

5. Sistema trimetrico monoclino. Forma fondamentale: *prisma monoclino*. Piani di simmetria: uno. Assi principali: tre, uno dei quali perpendicolare al piano degli altri due.

6. Sistema triclino. Forma fondamentale: *prisma triclino*. Piani di simmetria: nessuno. Assi principali: tre, disuguali, formanti fra loro angoli differenti.

CAPITOLO V.

MISURA DELLA QUANTITÀ DI CALORE.

§ 53. **Calorimetria - Calorìa.** — Vedemmo già come si misura la temperatura dei corpi ed osservammo che la temperatura di un corpo non deve confondersi colla quantità di calore che esso possiede. Ora studieremo come si misurano le quantità di calore, poichè osservammo già che le quantità di calore prodotte e consumate nei diversi fenomeni presentati dai corpi vanno considerate come grandezze misurabili e possono essere misurate con una unità opportunamente scelta.

La *calorimetria* è quella parte della Fisica che si occupa di queste misure; l'unità di misura adottata è la *calorìa*, cioè la quantità di calore necessaria per elevare da 0° ad 1° o più precisamente da 15° a 16° *un grammo* d'acqua.

Diremo poi *grande calorìa* la quantità di calore necessaria per elevare da 0° a 1° la temperatura di *un chilogrammo* di acqua. Essa è mille volte più grande della precedente e si potrebbe chiamare *chilo-calorìa.*

I bisogni delle industrie che impiegano il freddo, o più esattamente il desiderio di semplificare il linguaggio, hanno condotto ad impiegare a lato della calorìa non una nuova unità, ma una nuova espressione.

Le macchine frigorifere hanno per fine di sottrarre del calore ai corpi sui quali esse agiscono e la grandezza della loro azione si valuta mediante il numero di calorìe che tolgono. Si esprime ora questo risultato dicendo che la macchina ha fornito il medesimo numero di *frigorie* come se questa macchina agisse, non togliendo del calore, ma formando del freddo.

§ 54. **Calore specifico.** — In un vaso riscaldato a 50 gradi si versino due chilogrammi di acqua, uno alla temperatura di 0° e l'altro alla temperatura di 100°. Se, dopo aver agitato il miscuglio, si misura la sua temperatura, si trova che essa è di 50°. Per conseguenza il vaso non ha guadagnato nè perduto calore, ma il chilogrammo di acqua a 100° ha perduto il calore che è necessario per innalzare la sua temperatura da 50 a 100 gradi e lo ha ceduto al secondo chilogrammo, la cui temperatura è salita da 0° a 50°. Tutto ciò mostra che un dato peso di acqua esige sensibilmente, se non rigorosamente, una stessa quantità di calore per riscaldarsi di un medesimo numero di gradi, qualunque sia la temperatura iniziale.

Conseguentemente, per innalzare P chilogrammi di acqua da 0° a 1°, da 1° a 2°, da 2° a 3° ecc. occorrono P grandi calorìe, e ne occorrono Pt per innalzarli da 0° a t°.

Se ora in un chilogrammo di acqua a 0° si immerge un chilogrammo d'un'altra sostanza, che si trovi alla temperatura di 100°, essa cederà calore all'acqua, ma si raffredderà più di quanto non si scaldi l'acqua. Così si troveranno le seguenti variazioni di temperatura pei corpi immersi e per l'acqua nella quale si immergono:

	Variazione di temperatura	
	del corpo	dell'acqua
Mercurio	96°,78	3°,22
Ferro	89°,79	10°,21
Essenza di trementina	70°,10	29°,90

Questi numeri ci esprimono che occorrono quantità di calore disuguali per scaldare di uno stesso numero di gradi pesi uguali di sostanze differenti.

Ancora. Si abbiano delle sfere di diversi metalli, ma d'ugual peso. Dopo scaldate ugualmente (p. es. lasciandole alquanto immerse in un bagno d'olio a 200°) posiamole sopra un grosso disco di cera. Troviamo che esse affondano diversamente e cioè che esse liquefano differenti quantità di cera. Questa semplice esperienza di Tyndall ci mostra che i diversi corpi, ugualmente pesanti, assumono, per uguale dislivello di temperatura, quantità differenti di calore; ossia che occorrono quantità differenti di calore per far variare, entro gli stessi limiti, la temperatura di pesi uguali dei vari corpi.

Orbene, si chiama *calore specifico* di un corpo il numero di calorìe necessarie per innalzare di *un grado* la temperatura di *un grammo* di questo corpo. Tal numero varia colle condizioni fisiche della sostanza ond'è costituito il corpo, cioè con lo stato di aggregazione, la tempera, la temperatura ecc. Varia anche in un medesimo corpo col variare della temperatura ed in generale cresce per temperature più elevate.

Diremo *calore specifico medio* di una sostanza, fra due temperature t e t', il quoziente della divisione del numero Q di calorìe, necessarie a portare un grammo della sostanza medesima dall'una all'altra temperatura, pel numero di gradi $t' - t$. Indicando con c questo calore specifico medio, sarà

$$c = \frac{Q}{t' - t}. \tag{15}$$

Nelle nostre considerazioni useremo sempre il calore specifico medio.

§ 55. **Quantità di calore ceduta o ricevuta da un corpo, corrispondentemente ad una determinata variazione di temperatura.** — La conoscenza del calore specifico dei corpi ci pone in grado di determinare la quantità di calore acquistata o ceduta da un dato peso di sostanza, quando la sua temperatura siasi innalzata od abbassata di un numero dato di gradi; tale quantità Q di calore sarà data dal prodotto del peso p della sostanza, per il calore specifico c e per la variazione $(t - t')$ della temperatura. Si avrà cioè:

$$Q = cp\,(t - t'). \tag{16}$$

Se la temperatura più bassa t' è lo zero, sarà

$$Q = pct.$$

§ 56. **Calorimetri a ghiaccio.** — Noi ci occuperemo soltanto della determinazione del calore specifico medio dei corpi. Servono a

tal fine i *calorimetri*, i quali si prestano anche per la determinazione del calore specifico vero, corrispondente ad una data temperatura ed all'incremento di un grado, subìto da questa temperatura. Si hanno vari modelli di tali strumenti, che si sogliono distinguere in *calorimetri a ghiaccio* ed in *calorimetri a miscuglio*.

Il calorimetro a ghiaccio più semplice è quello ideato dal Black. Consiste (Fig. 41) in un blocco compatto di ghiaccio, su cui è praticata una cavità, che può chiudersi con una grossa lastra pure di ghiaccio.

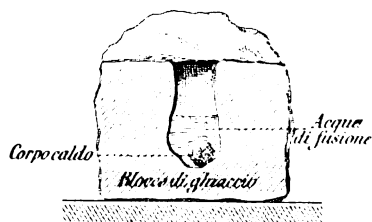



Fig. 41. - Calorimetro a ghiaccio del Black.

Ecco come con esso si determina il calore specifico di un corpo, quando si sappia che per fondere un chilogrammo di ghiaccio, senza alterarne la temperatura, occorrono 79 cal.,25; (del che ci si può render ragione, osservando che se sopra un chilogrammo di ghiaccio si versa un chilogrammo di acqua alla temperatura di 79°,25, il ghiaccio fonde e la mescolanza formata, dopo avvenuta la fusione, ha la temperatura di 0°).

Si scalda fino alla temperatura T un peso P della sostanza, della quale si vuol conoscere il calore specifico c e lo si introduce nel calorimetro, su cui si pone immediatamente il coperchio. Allora il corpo si raffredda fino a 0°, abbandonando così del calore, che determina la fusione di una certa quantità di ghiaccio. L'acqua liquida che si forma la si raccoglie e la si pesa. Se m è il suo peso, la quantità di calore, occorsa per renderla liquida, è uguale a $79{,}25\ m$ calorie e siccome questa quantità di calore proviene da un corpo, raffreddatosi di T gradi, potrà venire espressa anche dal prodotto PcT, dove P è il peso del corpo e c il suo calore specifico.

Si ha dunque:

$$PcT = 79{,}25\ m,$$

onde

$$c = \frac{79{,}25\ m}{PT}.$$

In fondo questo è il metodo immaginato da Wilcke (1772) e adattato da Lavoisier e Laplace (1780) in un apparecchio (Fig. 42), ormai caduto in disuso e costituito da tre recipienti, contenuti l'uno nell'altro. Il più interno è munito di molti fori e di un coperchio: in esso s'introduce il corpo, preventivamente portato ad una temperatura nota. Torno torno e al disopra, si pone ghiaccio, che il calore abbandonato dal corpo trasforma in acqua la quale, mediante apposito rubinetto, scende in un vaso sottostante. Il ghiaccio è disposto nel secondo recipiente, munito

Fig. 42. - Il calorimetro di Lavoisier e Laplace. La chiavetta rivolta verso il basso è quella che corrisponde al recipiente medio. Quella laterale corrisponde al recipiete esterno.

anch'esso di coperchio e collocato in un terzo recipiente in cui trovasi altro ghiaccio, che impedisce al calore esterno di penetrare. Quest'ultimo recipiente è provvisto a sua volta di un rubinetto dal quale fuoriesce l'acqua che si forma. L'imperfezione di tale apparecchio è evidente: basta infatti osservare che negli interstizi fra i pezzi di ghiaccio rimane una certa quantità d'acqua che è impossibile calcolare e nemmeno compensare (come proposero i due fisici francesi), bagnando preventivamente con acqua il ghiaccio adoperato.

Altro metodo calorimetrico è quello usato nel calorimetro di Bunsen (1875), nel quale, invece di pesar l'acqua che si forma per fusione del ghiaccio, si misura la diminuzione di volume, risultante dal passaggio del ghiaccio allo stato liquido (Fig. 43).

Il corpo da assoggettarsi a misura si pone in *O*, ove avviene il disgelo di parte dell'acqua contenuta in *A*, che fu preventivamente congelata intorno ad *O*. Il mercurio sottostante all'acqua di *A* e che continua a riempire un lungo tubo calibrato graduato, di cui *CD* rappresenta la parte iniziale, viene a sollevarsi in *A* per la diminuzione di volume dell'acqua, dovuta al disgelo. Lo spostamento del livello del mercurio nel tubo calibrato è proporzionale alla quantità di acqua disgelata e quindi alla quantità di calore che ha operato la fusione.

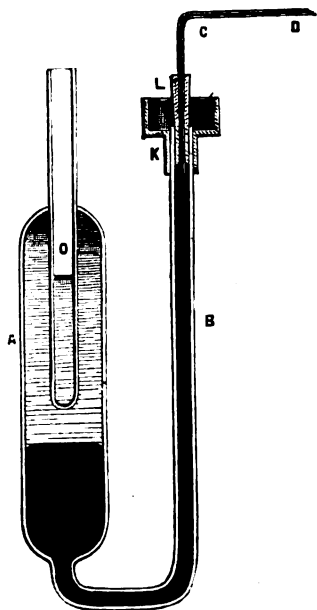



Fig. 43.

§ 57. **Calorimetro a miscuglio.** — Un altro metodo calorimetrico, ancora dovuto al Black, è quello designato colla denominazione di *metodo delle mescolanze*.

L'apparecchio che si adopera ha per parte essenziale (Fig. 44) un vaso cilindrico di ottone sottilissimo, sostenuto da corpi poco conduttori del calore. Esso contiene un peso d'acqua P' alla temperatura dell'ambiente t, un termometro sensibilissimo ed un agitatore metallico che permette, occorrendo, di agitare lentamente l'acqua così da renderne uniforme la temperatura. Questo vaso, con l'acqua che contiene, si chiama *calorimetro ad acqua* od *a mescolanze* od *a miscuglio*.

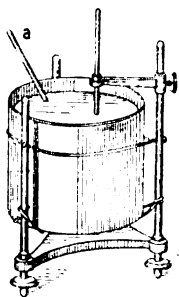



Fig. 44.

Si voglia con esso determinare il calore specifico di un corpo solido. Si scalda in una stufa alla temperatura T un peso P di questo corpo e si lascia cadere nell'acqua, che si tiene agitata, mediante un agitatore conveniente. Il corpo cede calore all'acqua, che si scalda da t^o fino ad una temperatura massima di θ^o, mentre esso si raffredda da T^o fino a θ^o. Ammettiamo per ora che in questa esperienza il calorimetro non disperda calore, nè per irradiazione, nè per conducibilità, nè per effetto dell'evaporazione dell'acqua; potremo scrivere allora che il calore

$Pc\,(T - \theta)$, ceduto dal corpo, è uguale a quello assorbito dal calorimetro, cioè: $P'(\theta - t)$.

Si avrà cioè

$$Pc\,(T - \theta) = P'\,(\theta - t),$$

da cui

$$c = \frac{P'\,(\theta - t)}{P\,(T - \theta)}.$$

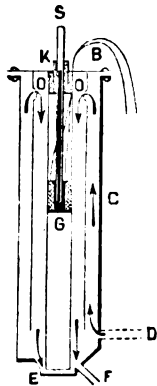



Fig. 45. - Una stufa per il riscaldamento di un corpo contenuto in *G*, da portare poi nel calorimetro.

Noi veramente abbiamo ammesso che il calore perduto dal corpo sia tutto acquistato dall'acqua, mentre in realtà parte è ceduto all'acqua, parte al recipiente, parte al vetro del termometro, parte al mercurio e parte all'agitatore, che serve a distribuire uniformemente il calore all'acqua. È chiaro che se

P_1 indica il peso del recipiente
c_1 » il suo calore specifico
P_2 » il peso del vetro del termometro
c_2 » il suo calore specifico
P_3 » il peso del mercurio
c_3 » il suo calore specifico
P_4 » il peso dell'agitatore
c_4 » il suo calore specifico,

sarà più rigorosamente:

$$Pc(T - \theta) = P'(\theta - t) + P_1c_1(\theta - t) + P_2c_2(\theta - t) + P_3c_3(\theta - t) + P_4c_4(\theta - t);$$

da cui

$$c = \frac{(P' + P_1c_1 + P_2c_2 + P_3c_3 + P_4c_4)\,(\theta - t)}{P\,(T - \theta)}.$$

Per trovare c bisognerebbe conoscere i calori specifici c_1, c_2, c_3 ecc., ma si può evitare questa difficoltà, notando che basta conoscere il valore della somma $P' + P_1c_1 + P_2c_2 + P_3c_3 + P_4c_4 = K$, valore che si ottiene operando come segue. Se si fa una esperienza preliminare, gettando nel colorimetro un peso π di acqua ad una temperatura T'; osservata la temperatura θ', assunta dal calorimetro, si scrive l'equazione:

$$\pi\,(T' - \theta') = K\,(\theta' - t),$$

la quale permette di calcolare K.

K è ciò che Regnault ha chiamato l'*equivalente in acqua* del calorimetro ed ha, naturalmente, un valore particolare per ogni calorimetro.

Varie e ripetute misure hanno portato alla nozione dei calori specifici dei corpi, che figurano in apposite tavole da consultarsi all'occorrenza.

Diamo qui i calori specifici di alcuni corpi solidi o liquidi, osservando che *la definizione di calorìa non è che la definizione del calore specifico dell'acqua,* poichè questo non varia sensibilmente colla temperatura:

Acqua	1	Piombo	0,0312
Argento	0,0570	Zolfo	0,2026
Stagno	0,0562	Mercurio	0,0333
Ferro	0,1138	Alcool	0,5475

§ 58. **Calore di fusione e di solidificazione.** — Coi calorimetri si può facilmente determinare il calore di fusione di un corpo. Sappiamo già che ogni corpo, nel fondere, assorbe una certa quantità di calore, e che si dice *calore di fusione* di un corpo la quantità di calore necessaria per fondere, senza cambiamento di temperatura, un grammo di quel corpo.

Orbene, ecco come si opera per fare, col calorimetro a miscuglio, questa determinazione. Supponiamo che il corpo da fondere sia un pezzo di ghiaccio. Lo si immerge nell'acqua e dall'aumento in peso del calorimetro, si deduce il peso P del ghiaccio. Se M è il peso dell'acqua, t la sua temperatura, p il peso del calorimetro, c il suo calore specifico e θ la temperatura finale del miscuglio e se, per semplicità, facciamo astrazione dal termometro e dall'agitatore, sarà, indicando con x il calore di fusione del ghiaccio:

$$M(t-\theta)+pc(t-\theta)=Px+P\theta,$$

ossia

$$(M+pc)(t-\theta)=Px+P\theta,$$

da cui

$$x=\frac{(M+pc)(t-\theta)-P\theta}{P}.$$

Si troverebbe per x il valore a noi noto: *79,25*. Il procedimento tenuto pel ghiaccio si applica, con molta facilità, ad ogni altro corpo.

Il valore del calore di fusione di un corpo è uguale numericamente al *calore di solidificazione*, dato dal numero di calorie sviluppate da un grammo di liquido nel passare allo stato solido, senza cambiamento di temperatura.

§ 59. **Calori specifici dei gas.** — La calorimetria dei gas è alquanto complessa.

Calore specifico di un gas è quella quantità di calore che bisogna fornire, per innalzarne di un grado l'unità di peso. Nel caso dei gas si distinguono *due* calori specifici c e c'; il calore specifico, cioè, a volume variabile e a *pressione costante*, ed il calore specifico c' a *volume costante* e pressione variabile. Giova notare che nel caso dei liquidi e dei solidi si misura soltanto c, poichè, data l'enorme resistenza che bisognerebbe vincere per impedire la dilatazione, non è possibile misurare c'. Evidentemente il calore specifico a pressione costante è maggiore del calore specifico a volume costante, perchè quest'ultimo equivale soltanto alla quantità di calore necessaria all'aumento di temperatura richiesto; l'altro equivale, oltrechè a questa quantità di calore, anche a quella necessaria a vincere il lavoro compiuto dalle forze esterne durante il dilatarsi del gas e a quella necessaria a vincere il lavoro interno, eseguito dalle forze molecolari.

Le esperienze, ad eccezione di poche recenti, hanno permesso di determinare direttamente solo il valore di c (coefficiente di dilatazione a pressione costante).

Si è osservato che per i gas in generale il rapporto $\frac{c}{c'}$ ha il valore 1,419 e così si può, dal calcolo, avere anche c', conosciuto che sia c.

§ 60. **Variazione, con lo stato fisico, del calore specifico dei corpi.** — Uno stesso corpo non presenta il medesimo calore specifico qualunque sia il suo stato fisico. Così l'acqua ha per calore specifico

0,5 allo stato di ghiaccio,
1 allo stato liquido,
0,48 allo stato di vapore.

Va notato il valore elevato del calore specifico dell'acqua, che fa appunto esercitare a questa (in natura) l'ufficio di serbatoio pel calore e di regolatore termico.

§ 61. **Legge di Dulong e Petit.** — Si è constatato, in modo approssimativo, che, salvo eccezioni, *il prodotto del calore specifico dei vari corpi solidi per il rispettivo peso atomico ha un valore costante,* oscillante intorno a *6,4*.

Si consulti in proposito il seguente prospetto:

Corpi	Calore specifico c	Peso atomico a	Prodotto ac (calore atomico)
Argento . .	0,057	108	6,2
Bismuto . .	0,0305	208	6,3
Rame. . . .	0,095	63,3	6,1
Litio	0,94	7	6,6
Zolfo	0,178	32	5,7
Zinco. . . .	0,096	65	6,2

Si noti che, mentre il peso atomico varia (negli esempi citati) da 7 a 208, cioè da 1 a 30, il prodotto ac si trova compreso fra 5,7 e 6,6, vale a dire varia fra 1 ed 1,2 circa.

CAPITOLO VI.

PRINCIPIO DELLA EQUIVALENZA E NATURA DEL CALORE.

§ 62. **Trasformazioni e cicli - Ciclo di Carnot.** — Un corpo può assoggettarsi a trasformazioni graduali, costituenti una serie continua di trasformazioni. Così un gas può assoggettarsi ad una graduale diminuzione di volume, con conseguente graduale aumento di pressione. Esso verrà successivamente a trovarsi in condizioni differenti; a subire una serie di trasformazioni differenti. Queste condizioni saranno rappresentabili ciascuna con facilità, mediante un punto in un diagramma pel quale si usi un asse a rappresentare i volumi ed un asse ad esso ortogonale a rappresentare le pressioni corrispondenti. Così il punto A della Fig. 46 rappresenterà la condizione del gas, che abbia una pressione p ed un volume v; il punto B la condizione del gas che abbia la pressione p' ed il volume v'.

Fra le tante di tali trasformazioni che possono farsi subire ad un corpo qualunque, ad un gas ad esempio, ve ne sono due particolarmente interessanti: sono le trasformazioni a temperatura costante o trasformazioni *isoterme*, e le trasformazioni effettuate in modo che il corpo che le subisce non scambi calore coll'esterno, dette trasformazioni *a calore costante* o trasformazioni *adiabatiche*. A ciascuna di queste trasformazioni corrispondono traiettorie del punto figurativo nel piano.

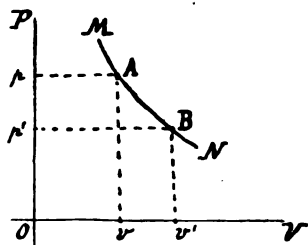



Fig. 46.

Si avranno — riferendoci al caso dei gas perfetti — per linee figurative delle prime trasformazioni, curve come quelle della Fig. 47, dette isoterme, corrispondenti alla equazione $pv = RT$ e per linee figurative delle trasformazioni adiabatiche (nelle quali il gas non subisce scambi di calore coll'esterno) curve come quelle della Fig. 48 dette adiabatiche. Queste ultime linee obbediscono ad una formola (di Laplace):

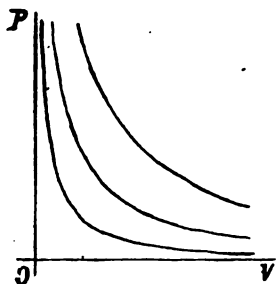



Fig. 47.

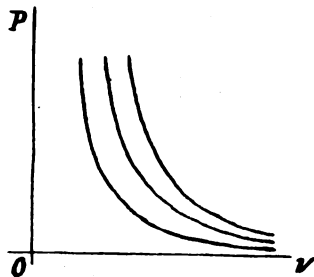



Fig. 48.

$pv^\gamma =$ *costante*, nella quale γ è il *rapporto dei due calori specifici del gas*, uguale a 1,41. Le formole ricordate consentono di dimostrare che si possono, per espansione adiabatica di un gas (diminuzione brusca della pressione alla quale il gas sia soggetto senza cessione o sottrazione ad esso di calore), ottenere degli abbassamenti di temperatura enormi.

Sia un gas alla temperatura assoluta iniziale T_0 ed abbia, sotto la pressione P_0, il volume V_0. Dopo l'espansione brusca abbia la pressione P, il volume V e la temperatura T. Poichè la trasformazione è adiabatica, sarà

$$P_0 V_0^\gamma = PV^\gamma. \qquad (17)$$

Siccome poi il gas obbedisce anche alle leggi di Mariotte e di Gay-Lussac, potremo scrivere:

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T} = R.$$

Ed eliminando $\frac{P_0}{P}$ dalle ultime due relazioni, si ha:

$$\frac{T_0}{T} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\gamma - 1}. \qquad (18)$$

Se si suppone che $\frac{V}{V_0} = 200$, il che corrisponde ad un salto di

pressione di 200 atmosfere; qualora la temperatura iniziale sia uguale a 0°, ossia $T_o = 273$; poichè $\gamma - 1 = 0{,}4$, si trova

$$T = \frac{273}{200^{0,4}} = \frac{273}{8{,}3} = 33.$$

Si realizza dunque un abbassamento di temperatura di 240° per un salto di pressione di 200 atmosfere.

Formola più precisa perchè tien conto delle differenze di comportamento dei vari gas è la seguente:

$$\theta = n\,(P_2 - P_1)\left(\frac{273}{T}\right)^2 \qquad (19)$$

nella quale θ rappresenta l'abbassamento di temperatura che si determina per una diminuzione adiabatica di pressione (in atmosfere) $P_2 - P_1$, in un gas inizialmente alla temperatura assoluta T. Con n si rappresenta un coefficiente caratteristico del gas, che per l'aria ha il valore 0,276.

Fra le diverse trasformazioni successive che si possono far subire ad un corpo, ve ne sono di quelle, tali che il punto figurativo descrive una curva chiusa (Fig. 49).

Questo caso è realizzato allorquando lo stato finale del corpo è identico allo stato iniziale. Per abbreviare il linguaggio si dice che il corpo soggetto alle trasformazioni corrispondenti *ha percorso un ciclo chiuso*.

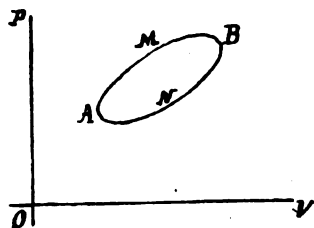



Fig. 49.

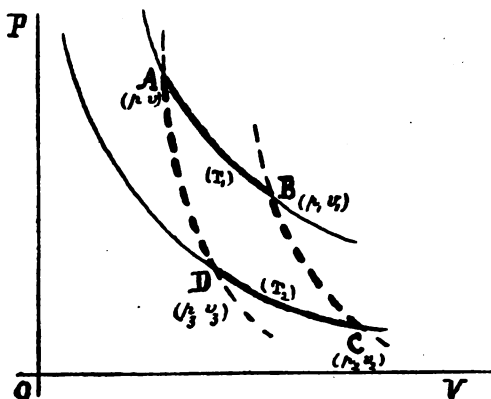



Fig. 50.

Quando lo stato finale non risulta identico a quello iniziale si deve dire che si percorre un ciclo non chiuso.

È facile dimostrare che il lavoro messo in esercizio (richiesto o compiuto) dal corpo nel percorrere il ciclo chiuso di trasformazioni ha per rappresentazione geometrica l'area della curva che rappresenta il ciclo chiuso medesimo. E, per convenzione, l'area racchiusa dalla curva rappresenta un lavoro *positivo* (lavoro fornito) se il punto figurativo descrive la curva nel senso secondo cui si muovono le lancette di un orologio; *negativo* (lavoro assorbito) nel caso contrario (senso opposto a quello delle lancette di un orologio).

Si dice che una trasformazione è operata per via *reversibile* quando è costituita da una successione di stati di equilibrio.

Questa definizione teorica di trasformazione spinta per via rever-

sibile mostra chiaramente che nella realtà una trasformazione non può prodursi per via rigorosamente reversibile.

Intendiamoci con un esempio.

Sieno due pesi uguali sospesi ad un filo del quale si può trascurare il peso e che passa per la gola di una puleggia perfettamente mobile. Siamo di fronte a un equilibrio indifferente; in qualunque posizione si mettano i pesi essi vi rimarranno. Queste posizioni costituiscono una successione di stati di equilibrio; la trasformazione consistente nel movimento del sistema e che, secondo la definizione, verrebbe operata per via reversibile, non si produrrà realmente. Ma per poco che si metta da una parte o dall'altra un piccolo sovraccarico, il movimento si effettuerà in un senso o nell'altro.

Un ciclo reversibile, degno di speciale menzione, è il cosidetto *ciclo di Carnot*, costituito dalla successione alternata di due trasformazioni isotermiche e di due trasformazioni adiabatiche; è quindi rappresentato da una specie di parallelogrammo curvilineo $ABCD$ (Fig. 50) costituito dalle due isoterme AB e DC, alle temperature rispettive T_1 e T_2, e dalle due adiabatiche BC e AD. Si dimostra che un ciclo reversibile qualunque può sempre decomporsi in un insieme equivalente di cicli di Carnot, infinitamente piccoli.

§ 63. **Calore e movimento.** — Ognuno ha avuto occasione di osservare che lo strofinamento di due corpi l'uno contro l'altro dà origine a calore. La sega del falegname si scalda quando questi taglia una tavola, come la lima del fabbro quando questi lavora un metallo; gli assi delle carrozze si riscaldano se non si ha cura di lubrificarli; il piano inclinato, da cui scende in mare una nave durante il varo, spesso si accende; i fiammiferi si infiammano per calore di frizione. Si assicura infine che certi popoli selvaggi accendono il fuoco strofinando un pezzo di legno secco e duro contro una tavola.

Fig. 51. - Facendo ruotare rapidamente fra una morsetta di legno un tubetto con etere, si produce tale riscaldamento da far si che il vapore di etere lanci violentemente il tappo del tubo.

Del pari si ha riscaldamento per l'urto reciproco di due corpi. Il pezzo di ferro che viene battuto sull'incudine si scalda, il proiettile di un fucile lanciato contro un conveniente ostacolo può subire un inizio di fusione, la palla di cannone, colpendo una corazza, si riscalda al rosso. E chi non ha visto che il violento scalpitare dei cavalli su strade pavimentate origina vivaci scintille per l'urto del ferro contro la pietra? Chiunque abbia usata una pompa da bicicletta, sa che si sviluppa del calore; dovuto in questo caso alla compressione d'un gas, l'aria.

In generale, possiamo dire che si produce sempre del calore là dove sembra distruggersi della energia meccanica. Si tratta della trasformazione di questa energia in calore.

In una macchina a vapore, nella quale, come diremo, si utilizza la forza elastica di questo per mettere in moto uno stantuffo entro ad un cilindro, il vapore si raffredda, spingendo lo stantuffo. Questa spesa di calore è la sorgente del lavoro di una macchina a vapore. Il raffreddamento prodotto da un gas compresso, che si espande bruscamente, sta in corrispondenza del lavoro che il gas effettua, a spese del proprio calore, vincendo la pressione dell'aria esterna. Tanto è vero che per produrre più agevolmente un raffreddamento con tale processo si procura di rendere più grande il lavoro esterno da effettuarsi per parte del gas.

Nello studio dei fenomeni termici abbiamo incontrato dei casi nei quali la scomparsa di calore è sempre accompagnata dalla produzione di qualche cosa, che può ritenersi lavoro meccanico interno al corpo dove si compie il fenomeno, e dei casi nei quali ad una possibile distruzione di lavoro interno si accompagna sviluppo di calore.

È noto ad esempio che, nell'atto della fusione, bisogna comunicare al corpo che fonde una certa quantità di calore che non ne innalza la temperatura, come pure si sa che un liquido nel vaporizzare assorbe del calore, che non ne innalza la temperatura. E questo calore che sembra scomparire, produce appunto nel corpo un qualche cosa che si può ritenere lavoro interno. Difatti scaldato che sia il solido sino alla temperatura di fusione, perchè questa si compia, bisogna svincolare le sue particelle, tanto che non siano più costrette a conservare le loro rispettive giaciture, ma possano anzi scorrere liberamente l'una sull'altra; per questo fa d'uopo superare l'azione della coesione, che si manifesta fortemente tra le molecole, anche alla temperatura di fusione e che risulta molto più debole nel liquido che ne deriva, nonchè l'effetto della forza di orientazione, almeno per i corpi a struttura cristallina, dove si distrugge il modo di aggruppamento molecolare da cui dipende quella struttura. Siccome poi, salvo in pochissimi casi, il volume del corpo riceve nel fondere un notevole aumento, così, quando ciò si verifichi, al lavoro interno della liquefazione si deve aggiungere quello della dilatazione, in contrasto alla pressione sostenuta dalla superficie del corpo.

Perchè avvenga la vaporizzazione di un liquido, bisogna disgregarne le molecole, renderle reciprocamente indipendenti, cosicchè non solo possano muoversi liberamente le une rispetto alle altre, ma tendano anzi a discostarsi sempre le une dalle altre. A tale effetto è pur necessario vincer la coesione residua del liquido e quella debole tendenza all'orientazione che si riscontra almeno tra le molecole dei liquidi viscosi: oltre a ciò ha poi sempre luogo un altro lavoro assai considerevole, dipendente dall'aumento del volume, in opposizione alla pressione esteriore. Ecco dunque corrispondere in ogni caso l'esecuzione di un lavoro alla scomparsa del calore.

Ma ciò che pone un più evidente legame fra lavoro meccanico e calore sono, come già dicemmo, la percussione e l'attrito. In riguardo meritano di essere citate le classiche esperienze del Rumford e del Davy. Rumford, sulla fine del secolo scorso, studiando lo svolgimento di calore che si ottiene nel trapanare un pezzo di artiglieria, trovò che girando il pezzo colla velocità di 32 giri al minuto, dopo due ore si

era svolto tanto calore da poter scaldare di 100° cinquanta litri d'acqua o di 5000° i 250 grammi di limatura che si erano raccolti, supponendo che avessero potuto reggere senza fondersi a questa temperatura.

Il Davy ottenne la fusione parziale di due pezzi di ghiaccio strofinandoli uno contro l'altro in un ambiente dove la temperatura era inferiore a 0° e prendendo le più minute precauzioni, affinchè i due pezzi non potessero ricevere calore da nessun corpo circostante.

§ 64. **Equivalente meccanico della calorìa ed equivalente termico del chilogrammetro.** — Nelle operazioni nelle quali si spende calore per produrre un lavoro (macchina a vapore) ed in quelle nelle quali si spende del lavoro, con corrispondente produzione di calore (urto, attrito), un determinato numero di calorìe Q corrisponde sempre ad uno stesso lavoro L, cosicchè *il rapporto fra* L *e* Q *risulta costante.* Potremo quindi scrivere: $\frac{L}{Q} = E.$

È questo l'enunciato del *principio della equivalenza o della proporzionalità fra calore scomparso e lavoro effettuato* o fra lavoro speso e calore prodotto.

Una *grande calorìa* e *425 chilogrammetri* si sostituiscono in una trasformazione; *425 è l'equivalente meccanico della grande calorìa; 0,425 è l'equivalente meccanico della calorìa.*

Poichè l'unità di lavoro, che si chiama *joule*, pari a 10^7 *erg* od *ergon*, equivale a $\frac{1 \text{ chilogrammetro}}{9,81}$, in *joule* l'equivalente meccanico della calorìa è $4,17 = 0,425 \times 9,81$ e in *ergon* sarà $4,17 \times 10^7$.

L'*equivalente calorifico del chilogrammetro è* $\frac{1}{425}$ *in grandi calorìe ed* $\frac{1}{0,425}$ *in piccole calorìe.* L'equivalente dell'*ergon* è $\frac{1}{4,17 \times 10^7}$.

Joule ed Hirn fecero le prime determinazioni dell'equivalente meccanico della calorìa, per il caso della trasformazione di lavoro meccanico in calore, mediante attrito (Joule), e mediante urto (Hirn).

Hirn ha determinato l'equivalente meccanico del calore anche nella trasformazione inversa del calore in lavoro, valendosi di una macchina a vapore e trovando il valore già indicato.

Il rapporto fra calore e lavoro, essendo risultato sempre costante ed uguale al numero suddetto, in tutti i casi numerosi e svariati presi in esame, va ritenuta una conclusione sperimentale ormai ben assodata, a proposito della quale conviene però notare che, se può illuminare sulla natura del calore, è tuttavia indipendente da qualsiasi ipotesi intorno a siffatta natura.

§ 65. **Determinazioni sperimentali dell'equivalente meccanico.** — *Metodo di Mayer.* — Il primo che tentò la determinazione dell'equivalente meccanico della calorìa fu il Mayer con un metodo assai ingegnoso.

Si sa che i gas hanno un calore specifico maggiore a pressione costante che a volume costante. Supponendo (il che è lecito) che per nulla calore vada speso in lavoro interno al gas, possiamo valutare le calorìe richieste ad aumentare di un grado la temperatura di un dato

peso del gas, contenuto in un cilindro verticale, munito di stantuffo mobile, operando prima a pressione costante, poi a volume costante. Eseguendo la differenza fra i valori trovati nel primo e nel secondo caso, essa ci darà la quantità di calore impiegato nel lavoro di innalzamento dello stantuffo stesso. Dividendo il valore di tale lavoro, si avrà per la indicata quantità di calore il valore dell'equivalente meccanico.

Sia P il peso dello stantuffo, h il tratto di cui esso si innalza allorchè il gas, nel cilindro, aumenta la propria temperatura di t gradi. Sia p il peso del gas contenuto nel cilindro stesso, c il suo calore specifico a pressione costante, e c' il calore specifico a volume costante. Il calore impiegato nell'innalzamento dello stantuffo sarà $p \cdot t\,(c - c')$; ed il valore dell'innalzamento sarà Ph, per cui si avrà:

$$E = \frac{Ph}{p \cdot t\,(c - c')}.$$

Operando con l'aria, il Mayer trovò per E un valore assai diverso da 425 chilogrammetri: ma aveva adottato per c e c' dei valori poco esatti. Usando per c e c' i valori determinati posteriormente da Regnault, si trova che E vale circa 425 chilogrammetri.

Metodo di Joule. — Joule in un calorimetro a miscuglio faceva ruotare una ruota a palette, mediante la discesa dei due dischi pesanti Q, P, attaccati a due corde avvolte nello stesso senso su di un rullo continuante in alto l'asse di rotazione della ruota. Una di esse passava sulla carrucola B e l'altra sulla carrucola A'. Entrambe erano fissate per l'altro capo al rullo. Il lavoro meccanico, che equivaleva al moto della ruota a palette, si aveva moltiplicando i due pesi per l'altezza da cui discendevano e diminuendo tale prodotto di quella quantità che si traduceva in forza viva dei due pesi e nell'attrito delle due carrucole. Col solito metodo calorimetrico si misuravano le calorie prodotte da tale lavoro nel recipiente C. Dal rapporto fra lavoro e calore si passava alla valutazione di E.

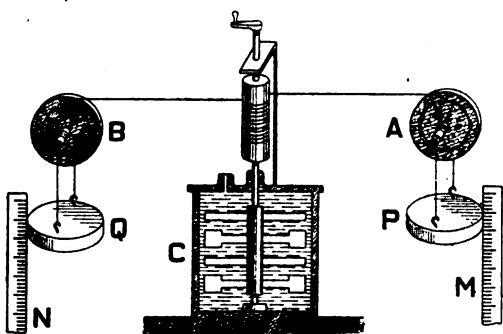



Fig. 52.

Se P' è il peso di ciascuno dei cilindri Q, P e h l'altezza da cui discendono, $2P'h$ sarà il lavoro meccanico di questa discesa. Sia v la velocità assunta da ciascun peso, cadendo; la forza viva al termine della discesa sarà, per ogni peso, $\frac{P'v^2}{2g}$ e, per entrambi, $\frac{P'v^2}{g}$.

Si cerchi coll'esperienza il peso p che occorre aggiungere ad uno dei due pesi P e Q, perchè le carrucole ruotino colla stessa velocità con cui ruotavano nell'esperienza antecedente, mentre le due funi, riunite in continuazione l'una dell'altra, siano di nuovo avvolte dal rullo, coi pesi agli estremi liberi. Calorimetro e ruota a palette debbono però

essere esclusi. Sarà ph il lavoro corrispondente all'attrito delle carrucole, onde il lavoro meccanico impiegato a far ruotare la ruota a palette, e perciò impiegato a produrre calore, in n cadute sarà:

$$2nPh - \frac{nPv^2}{g} - nph.$$

Dividendo questa quantità per la quantità C di calore apprezzata dal calorimetro, si otteneva il valore dell'equivalente E. A rigore però Joule aggiungeva alle calorie sviluppate C la quantità di calore che si disperdeva nell'ambiente durante l'esperienza, e ciò in base alle leggi del raffreddamento, di cui parleremo più innanzi (§ 96).

Joule con questo fece molte esperienze sull'acqua, usando di una ruota a palette di legno, e sul mercurio, usando di una ruota a palette di ferro; inoltre facendo ruotare un disco di ferro, fisso all'albero ab, sopra un altro disco pur di ferro, tenuto immobile nel calorimetro. Il valore medio da lui trovato per E fu di 425 chilogrammetri.

Metodo di Hirn. — Hirn sospese orizzontalmente, mediante funi, un prisma di pietra (che chiamava *incudine*) molto pesante, di peso P e, sul suo prolungamento, mediante altre funi, una trave (che chiamava *martello*) di legno di peso p, in modo che, nella posizione d'equilibrio, le testate di ferro, di cui la trave e il masso erano muniti, fossero di fronte e lasciassero fra loro un pezzo di piombo sostenuto in alto mediante una funicella. Allora, sollevando la trave come un pendolo, la lasciava cadere. Il lavoro fatto da questa nell'urto che produce ritornando alla sua posizione di equilibrio (prodotto dal suo peso per l'altezza h, a cui era stata sollevata) produce tre effetti: 1° eseguisce il lavoro necessario per spingere il prisma o *incudine* ad una certa altezza H (prodotto del peso del masso per questa altezza); 2° fa il lavoro necessario pel rimbalzo del martello ad una certa altezza h' (prodotto del suo peso per questa altezza); 3° riscalda il piombo.

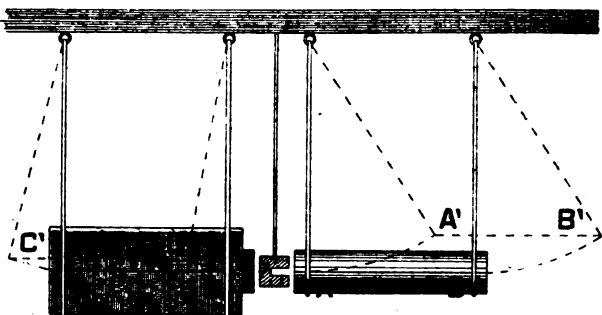



Fig. 53.

La quantità Q di calore comunicato al piombo (determinabile con un calorimetro sottostante al piombo e sul quale questo si lascia poi cadere, tagliando la funicella) è dunque dovuto alla differenza tra il lavoro totale prodotto dalla trave cadendo e la somma dei lavori di cui ai numeri 1° e 2°. Si avrà allora:

$$E = \frac{p\,(h - h') - PH}{Q}.$$

Hirn, operando con questo metodo, trovò per E il valore di circa 425.

§ 66. **Natura del calore.** — La produzione di calore con consumo di lavoro illuminò i fisici sulla natura del calore e li condusse ad ammettere, che il calore non può essere un fluido imponderabile, come fino allora si era ammesso, ma un'energia consistente nel moto delle ultime particelle dei corpi.

Ciò specialmente quando si constatò con evidenza che allo svolgimento di una grande caloria è necessario il lavoro determinato di 425 chilogrammetri.

Il *calore non sarebbe dunque materia, ma energia*, come sempre abbiamo cercato di insinuare nelle precedenti nostre trattazioni.

E precisamente energia di movimento traslatorio delle particelle in tutti i sensi, per il caso dei gas, energia di movimento ancora traslatorio, ma meno libero, per il caso dei liquidi, energia di movimento vibratorio delle particelle, per il caso dei solidi. Nei gas, in conseguenza del calore da essi posseduto, le particelle che li costituiscono si muoverebbero in tutti i sensi; l'una in un senso e l'altra in altro ne attraverserebbero la massa più volte in breve tempo, seguendo un cammino a zig-zag, in conseguenza dell'incontro con altre particelle; ne determinerebbero, coi loro urti alla superficie interna del recipiente, la *pressione*.

Nei liquidi il cammino di traslazione delle particelle sarebbe assai più tortuoso che non nei gas, per il più frequente incontro con le altre particelle; ma tale da permettere ancora ad una particella di passare da un estremo ad un altro della massa liquida.

Nei solidi questa possibilità non si avrebbe; la particelle rimarrebbero all'incirca nella stessa regione del corpo, salvo un piccolo movimento di rotazione o vibrazione, intorno ad una posizione intermedia.

Premesso che tutti i corpi, nelle condizioni ordinarie nelle quali ci troviamo, possiedono calore, comunicar loro calore vorrebbe dunque dire aumentare l'intensità dei moti traslatorî (e vibratorî) delle particelle onde sono costituiti; moti diversi a seconda dei diversi stati di aggregazione.

Se si potesse invece comunicare calore ad un corpo, che ne fosse totalmente sprovvisto, perchè posto in condizioni speciali, vorrebbe dire stabilire in esso quei movimenti.

§ 67. **Il principio della conservazione dell'energia - L'impossibilità del moto perpetuo.** — Il principio della equivalenza fra calore e lavoro fu il punto di partenza per una generalizzazione, che, sulle prime osteggiata, divenne poi una delle grandi conquiste della fisica moderna. Menti poderose come quelle di Mayer, di Helmholtz, di Joule videro e giustificarono, come meglio poterono, una equivalenza in ogni trasformazione di energia, donde la espressione del principio delle conservazione dell'energia per un sistema meccanico isolato, vale a dire sottratto a qualsiasi azione esteriore.

Un sistema che non ceda e non riceva influenza alcuna dall'ambiente esterno, subirà delle modificazioni per le azioni mutue delle sue parti, ma la quantità di energia che esso possiede non aumenterà, nè diminuirà. Se una quantità di energia scompare in esso sotto una certa forma, ne apparisce una quantità equivalente sotto un'altra forma.

Dire questo è dichiarare l'*impossibilità del moto perpetuo* che molti

sognatori, taluni anche intelligenti, credevano di poter realizzare. Il moto di una qualsiasi macchina incontra necessariamente attriti, e qualora si conferisca alla macchina una certa quantità iniziale di energia, che ne determini il movimento (anche se dalla macchina non si richieda un determinato lavoro, cosicchè essa serbi per sè stessa l'energia conferitale), questa dovrà in un tempo più o meno lungo esaurirsi nel vincere gli attriti, con conseguente arresto del moto della macchina.

L'Universo si considera, nel suo complesso, come un sistema per il quale risulta valido il principio della conservazione dell'energia.

Si esprime talora questo principio, dicendo che nelle trasformazioni di energia nulla si perde. Non è modo esatto di dire; perchè se nelle trasformazioni di energia, questa non diminuisce nè cresce, non subisce cioè modificazioni in quantità, perde però in qualità, come avremo presto occasione di dichiarare.

§ 68. **Sorgenti di calore.** — La sorgente principale di calore è il Sole. Di essa diremo in modo particolare nel paragrafo seguente, molto più che si può ritenere la causa ultima delle sorgenti immediate, oggetto del presente paragrafo e classificabili in meccaniche, fisiche, chimiche, fisiologiche.

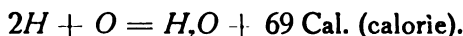
I. Sorgenti meccaniche: Le più notevoli sono l'attrito, la percussione e la compressione.

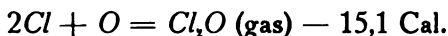
II. Sorgenti fisiche: Sono numerose e varie. Possiamo citare l'occlusione dei gas in alcuni solidi (spugna di platino); il riscaldamento di un conduttore percorso da forte corrente elettrica.

III. Sorgenti chimiche: La formazione o la decomposizione di un composto chimico è sempre accompagnata dallo svolgimento o dall'assorbimento di una certa quantità di calore, in altre parole da un effetto *termico*. In moltissimi casi questo effetto termico venne accuratamente misurato. Così la calce viva, combinandosi con l'acqua, l'acido solforico con lo zinco, i componenti della polvere pirica tra loro, l'idrogeno col cloro, e così via, sviluppano quantità più o meno grandi di calore. La combustione è il più eloquente fenomeno chimico di reazione che avvenga con sviluppo di calore. Si dice *potere calorifico* di un combustibile il numero di calorìe prodotte da 1 kg. di questo corpo, che abbruci perfettamente. Questo potere è massimo per l'idrogeno (34462 calorìe), assai minore pel carbonio (circa 8000 calorìe), intermedio per gli idrocarburi; in questi sarà tanto minore quanto maggiore è il numero di atomi di carbonio che essi contengono nella loro molecola.

I processi chimici, nei quali si svolge calore, si dicono *esotermici*, quelli invece nei quali si assorbe calore diconsi *endotermici*.

Un esempio dei primi è la formazione dell'acqua dai suoi elementi, *idrogeno* (H) e *ossigeno* (O):

$$2H + O = H_2O + 69 \text{ Cal. (calorìe).}$$

Un esempio dei secondi è la formazione dell'anidride ipoclorosa dagli elementi *cloro* (Cl) e *ossigeno* (O):

$$2Cl + O = Cl_2O \text{ (gas)} - 15{,}1 \text{ Cal.}$$

Si chiama *termochimica* la parte della chimica che studia il calore svolto

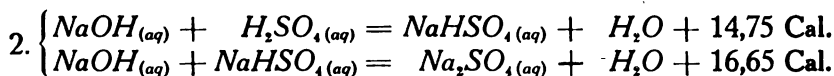
od assorbito nelle trasformazioni chimiche. Le leggi generali che la regolano sono le seguenti:

1. La quantità di calore prodotta in una combinazione non dipende dalla durata di questa.

2. *Legge di Hess*: l'effetto termico complessivo (svolgimento totale di energia) che accompagna la trasformazione di un sistema chimico in un altro è indipendente dagli stati intermedi per cui passa il sistema.

Questa legge — giova notarlo — è una conseguenza diretta del principio della conservazione dell'energia; poichè se essa non si verificasse si potrebbe, trasformando un sistema in un altro e facendolo quindi ritornare allo stato primitivo per un'altra via, guadagnare o perdere lavoro, ciò che è in contraddizione col suddetto principio. Diamo un esempio che chiarirà meglio il concetto. Una soluzione diluita di solfato di sodio (Na_2SO_4) si può ottenere, mescolando direttamente potassa caustica ($NaOH$) in soluzione diluita con acido solforico (H_2SO_4) diluito, nel rapporto di due molecole della prima a una molecola del secondo; oppure si può aggiungere dapprima una sola molecola di $NaOH$ all'H_2SO_4 e poi la seconda:

$$1.\quad 2NaOH_{(aq)} + H_2SO_{4\,(aq)} = Na_2SO_{4\,(aq)} + 2H_2O + 31{,}4\ \text{Cal.}$$

$$2.\quad \begin{cases} NaOH_{(aq)} + H_2SO_{4\,(aq)} = NaHSO_{4\,(aq)} + H_2O + 14{,}75\ \text{Cal.} \\ NaOH_{(aq)} + NaHSO_{4\,(aq)} = Na_2SO_{4\,(aq)} + H_2O + 16{,}65\ \text{Cal.} \end{cases}$$

Somma 31,40 Cal.

3. La quantità di calore prodotta in una combinazione è tanto maggiore, quanto più stabile è il composto ottenuto.

4. La quantità di calore assorbita nella decomposizione di un dato composto è uguale a quella che si produce nella combinazione dei suoi elementi.

IV. Sorgenti fisiologiche: Alla categoria delle sorgenti chimiche spetta il calore sviluppato dalle azioni fisiologiche, cioè dal lavoro vitale degli animali e anche delle piante.

Per gli animali si tratta della lenta combustione, cioè della combinazione dell'ossigeno del sangue arterioso con l'idrogeno e col carbonio, introdotti mediante gli alimenti.

§ 69. **Calore solare.** — Il Sole va considerato come la sorgente essenziale del calore che a noi si manifesta nei vari modi considerati nel precedente paragrafo. Sarebbe infatti facile ripetere un semplice ragionamento, atto a provare che in fondo la forza idraulica, la forza dei venti, la combustione, la forza muscolare, e così via, sono dovute al calore solare inviato alla Terra da tempo incalcolabile.

Per misurare il calore che il Sole invia alla Terra, furono immaginati vari apparecchi, detti *piroeliometri* o *attinometri*; con questi apparecchi si è trovato che in media (fatta astrazione dal calore assorbito dall'aria) ogni centimetro quadrato della superficie terrestre, rivolto verso il Sole, ne riceve, ad ogni minuto primo, 2,76 calorie (piccole). Da ciò risulta

che il calore che il Sole invia in un anno alla Terra sarebbe capace di fondere uno strato avvolgente di ghiaccio, di spessore pari a 32 metri circa. Sembra però che il valore trovato per la *costante solare* sia inferiore al vero, poichè determinazioni posteriori, eseguite con altri piroeliometri, hanno dato, come valore medio di detta costante, il numero 2,8 (numero di piccole calorìe, inviate perpendicolarmente dal Sole su di 1 cm.^{2}, posto ad una distanza dal Sole uguale a quella della Terra). La temperatura del Sole fu calcolata (Rossetti) a circa 10000°. Sulle cause che producono il calore solare sono state proposte varie ipotesi. Una è quella di una vera e propria combustione, ma va esclusa, perchè sarebbero bastati al consumo totale i 40 secoli trascorsi dal primo apparire della vita umana sulla Terra. Una seconda (Mayer) ammette che il calore solare sia dovuto alla percussione di un'infinità di aeroliti che vi cadono sopra continuamente con fortissima velocità, e che pure non ne aumentano sensibilmente la massa. Una terza (Helmholtz) ammette che il Sole, come già fecero i pianeti, vada di mano in mano condensandosi, producendo in tal modo enorme calore, ma senza che ciò apporti una sensibile diminuzione del volume: tantochè ha calcolato che una diminuzione di 1/10000 del diametro solare (invisibile a noi) basterebbe per produrre tanto calore quanto ne manda il Sole in più di 20 secoli. Se si ammettono contemporaneamente le due cause contemplate nelle ipotesi di Mayer e di Helmholtz si comprende come, compensandosi a vicenda, il volume del Sole debba mantenersi press'a poco invariato.

Una più recente ipotesi è basata sulla radioattività, della quale il Sole sarebbe fortemente dotato, e della quale parleremo più avanti.

§ 70. **Calore terrestre.** — Ve n'è una parte che la Terra riceve quotidianamente per radiazione solare e che viene poi rimandato per irradiazione tutt'attorno negli spazi celesti, e ve n'è un'altra parte che essa tiene immagazzinato, per così dire, essendo ancora enormemente calda la sua parte centrale.

Ad una certa profondità difatti, variabile colla latitudine, si trova uno strato (detto a temperatura costante) in cui la temperatura si mantiene costante per tutto l'anno, nonostante le variazioni che si hanno alla superficie esterna. Questo strato, che per noi si trova a circa 25 metri di profondità, è molto meno profondo (meno di un metro) verso l'equatore e sempre più profondo verso i poli.

Si è poi constatato che se si scende al disotto di questo strato, mediante pozzi profondi, la temperatura aumenta di 1° per circa 33 metri di profondità, per cui, se questo rapporto si conservasse invariato, si avrebbe al centro della Terra una temperatura elevatissima.

CAPITOLO VII.

VAPORIZZAZIONE - SUBLIMAZIONE - LIQUEFAZIONE.

§ 71. **Vaporizzazione.** — Ognuno sa che un liquido, abbandonato a sè stesso in recipiente aperto, finisce per scomparire dal recipiente in un tempo più o meno lungo. Ciò è dovuto al passaggio del

liquido allo stato aeriforme. Il fenomeno ha ricevuto il nome di *vaporizzazione*, ed è facile persuadersi che esso si produce con certi liquidi più rapidamente che con altri, più rapidamente, ad esempio, con etere che con acqua. Si dicono *volatili* quei liquidi che subiscono in modo sensibile il fenomeno della vaporizzazione.

Come l'etere è più volatile dell'acqua, l'acqua lo è più del mercurio.

Si chiama *vapore* l'aeriforme formatosi mediante la vaporizzazione; esso possiede, come ogni aeriforme, una *pressione* che spesso chiamasi anche *tensione*; non differisce sostanzialmente da un gas, ma si conviene di chiamar *vapore* l'aeriforme, che nelle condizioni ordinarie di temperatura e di pressione è allo stato liquido o allo stato solido, e *gas* l'aeriforme che possiede questo medesimo stato aeriforme nelle condizioni ordinarie di temperatura e di pressione.

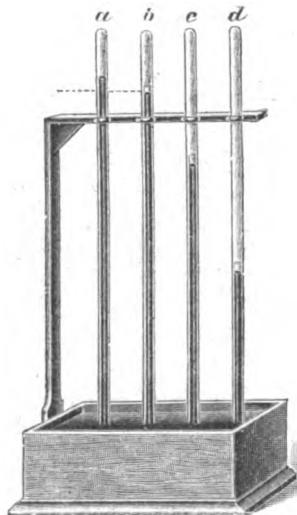



Fig. 54. - Apparecchio che permette di dimostrare la immediata vaporizzazione di liquidi vari nel vuoto torricelliano, e la diversa forza elastica dei vapori ottenuti. In *A* tubo torricelliano di confronto.

La vaporizzazione si compie quasi istantaneamente nel vuoto, come si può vedere facendo vaporizzare un liquido in un ambiente, nel quale sia stata rarefatta l'aria o nella camera barometrica di un tubo torricelliano (Fig. 54).

Ma è bene notare che non è necessario che una determinata regione dello spazio sia vuota, affinchè vi si formi del vapore. La vaporizzazione in un ambiente contenente un gas ha luogo ugualmente, sebbene con maggior lentezza. Misure precise hanno permesso di enunciare in proposito una legge, che enunceremo nel § 73.

§ 72. **Vapore non saturo e vapore saturo - Tensione massima.** — Un tubo torricelliano — capovolto in una vaschetta profonda — permette, se immerso più o meno nella vaschetta, di far variare il volume della camera barometrica e quindi anche il volume consentito al vapore. Orbene, se si inietta nel *vuoto torricelliano* — mediante opportuna manualità — una certa quantità di liquido, etere ad esempio, si nota subito un abbassamento di livello del mercurio, dovuto alla pressione del vapore rapidamente formatosi. La differenza di livello fra il mercurio del tubo e quello della vaschetta ci permette di avere in mm. di mercurio il valore di questa pressione. Possono presentarsi due casi: o sul mercurio del tubo non vi ha più liquido, o vi ha ancora un po' di liquido, non ancora passato allo stato di vapore.

Nel *primo caso* basterà diminuire il volume della camera barometrica, per ottenere a un certo momento una traccia di liquido, che andrebbe gradatamente accrescendosi se si continuasse nella graduale diminuzione del volume.

Prima di raggiungere la formazione di una traccia di liquido, il vapore si dice *non saturo*, perchè se nella camera barometrica si introducesse nuovo liquido, questo passerebbe, tutto o parzialmente, allo stato

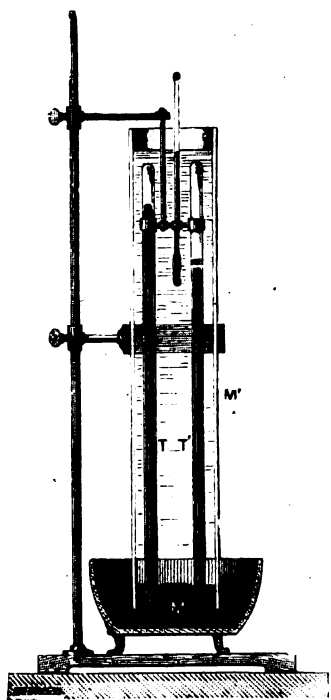



Fig. 55. - Apparecchio per dimostrare che la tensione massima del vapore nel tubo torricelliano *T'* cresce colla temperatura. A ciò serve il manicotto *M'* che può contenere un liquido a temperatura varia per portare il vapore a temperatura varia ed il barometro *T* di confronto per la misura relativa della pressione.

di vapore: il vapore in sostanza consentirebbe l'aggiunta a sè di nuovo vapore.

Quando è raggiunta la formazione di una traccia liquida, la camera barometrica è satura di vapore, prova ne sia che immettendo in essa nuovo liquido, questo non si trasforma in vapore. Si dice anche che il vapore contenuto nella camera barometrica è *saturo*.

Sono queste le condizioni in cui si trova il vapore, nel *secondo caso*.

Ebbene, mentre il vapore è saturo, una diminuzione di volume porta al suo parziale passaggio allo stato liquido, ma una volta fissata la temperatura, la pressione sua rimane inalterata, come ci attesta la costanza del dislivello fra il mercurio del tubo e quello della vaschetta. Siffatta pressione chiamasi *pressione* o *tensione massima*. Per ciascun liquido essa ha un valore determinato per ogni temperatura, cresce col crescere della temperatura. Lo mostra una facile esperienza (Fig. 55). Da misure rigorose risultano i valori indicati nel seguente prospetto, tradotti in parte nel diagramma della Fig. 57.

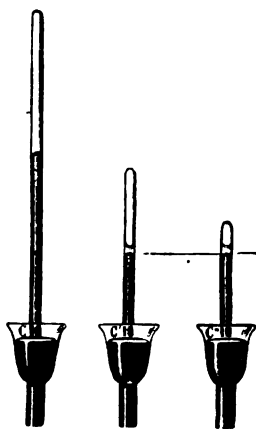



Fig. 56. - Un vapore non saturo, per diminuzione di volume può divenire saturo e la sua tensione cresce, ma dopo, diminuendone il volume, la tensione non muta, se si opera a temperatura costante.

Temperature	Tensione massima in millimetri di mercurio	Tensione massima in atmosfere
— 30 gradi	0,39	0,0005
— 20 »	0,93	0,0012
— 10 »	2,09	0,0028
0 »	4,60	0,0061
+ 10 »	9,17	0,0120
+ 20 »	17,39	0,0229
+ 50 »	91,98	0,121
+ 100 »	760,—	1,000
+ 150 »	3581,23	4,71
+ 200 »	11688,96	15,14
+ 230 »	20926,40	27,5

Quando il vapore non è saturo una diminuzione di volume porta ad un aumento di pressione sensibile, come vuole la legge

di Boyle, e come ci attesta la variazione del suindicato dislivello.

Cessa l'aumento di pressione quando, con la diminuzione graduale del volume, il vapore sia divenuto infine saturo e con una ulteriore (anche piccola) diminuzione di volume abbia dato luogo a parziale formazione di liquido.

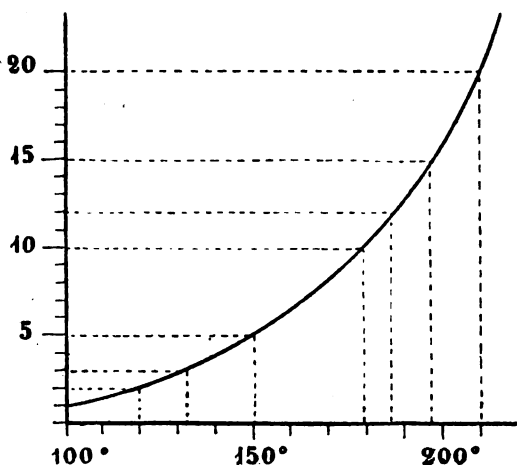



Fig. 57. - Curva rappresentatrice della variazione della tensione massima del vapore acqueo colla temperatura.

Questa è la ragione per cui la tensione del vapor saturo di un corpo vien chiamata tensione massima: infatti, alla temperatura a cui si trova, il vapore di quel corpo non può raggiungere pressione più elevata. Più bassa diventa invece, se, per aumento di volume, il vapore cessa di essere saturo.

Siccome la tensione massima di un vapore cresce con la temperatura, si avrà che con la diminuzione della temperatura un vapore saturo passerà parzialmente allo stato liquido. In sostanza potremo asserire quanto segue:

Per *vapore saturo* si intende un vapore che passa parzialmente allo stato liquido, in causa d'una diminuzione (anche piccolissima) del suo volume o della sua temperatura.

È saturo certamente un vapore in equilibrio, che si trovi in presenza del proprio liquido.

Sarà *vapore non saturo* quello che consente una diminuzione del suo volume o della sua temperatura, senza passare parzialmente allo stato liquido. In generale sarà non saturo un vapore che non si trovi in presenza del proprio liquido, ma siffatta condizione può presentarsi, o per artificio o per puro caso, anche con un vapore saturo.

§ 73. **Mescolanza di gas e di vapori.** — Dalton enunciò le due leggi seguenti, le quali vennero poi confermate da Gay-Lussac e da Regnault:

1. In un ambiente che contenga uno o più gas insieme mescolati, la vaporizzazione di un liquido è molto più lenta che non nel vuoto; ma quando questa vaporizzazione abbia portato alla saturazione, allora la pressione massima del vapore, mescolato ai gas, risulta uguale alla tensione massima che avrebbe nel vuoto.

2. Saturo o non saturo che sia il vapore, la pressione della mescolanza (come per la mescolanza di soli gas) uguaglia la somma delle singole pressioni dei gas e del vapore ad essi mescolato.

§ 74. **Due processi di vaporizzazione.** — Generalmente, per ottenere vapore da un liquido, non lo si abbandona a sè stesso, come potrebbe supporsi in base alla considerazione del § 71, ma lo

si riscalda. Il liquido va per tal modo soggetto a *vaporizzazione* copiosa.

La vaporizzazione all'aria libera o nel vuoto si chiama *evaporazione*, se riguarda le sole particelle superficiali del liquido; *ebollizione* se avviene con moto tumultuoso del liquido, perchè riguarda anche la massa interna di questo.

§ 75. **Evaporazione.** — Circa la evaporazione la esperienza prova che:

1. La evaporazione avviene tanto più rapidamente, quanto più grande è la superficie libera del liquido e quanto più piccola è la pressione che su di esso grava.
2. È più rapida se l'aria sovrastante al liquido è esente dal vapore che deve formarsi, meno rapida se ne contiene.
3. Una elevazione di temperatura favorisce la evaporazione.
4. L'agitazione dell'aria sovrastante al liquido ne favorisce la evaporazione, in quanto sostituisce con aria secca l'aria già arricchitasi di vapore al di sopra del liquido.
5. La evaporazione è accompagnata da un assorbimento di calore.

Dalton trovò che la quantità di liquido evaporata nell'unità di tempo dalla superficie libera d'estensione S è espressa dalla relazione

$$q = \frac{BS}{H}(F - f), \qquad (20)$$

ove F rappresenta la tensione massima del vapore alla temperatura dell'ambiente, f la tensione attuale del vapore nell'aria sovrastante il liquido, H la pressione atmosferica e B un coefficiente costante. Dalton trovò inoltre che questo coefficiente è il medesimo per l'acqua e per l'alcool. Per determinate condizioni dell'aria e per una determinata massa liquida si può scrivere che q è proporzionale ad $F - f$, cioè che

$$q = K(F - f). \qquad (21)$$

Degna di speciale attenzione è l'*evaporazione di una soluzione*.

Quando una soluzione evapora, è il solo solvente che passa allo stato di vapore, separandosi così dal corpo disciolto. Raggiunta per tal modo la saturazione della soluzione, la successiva evaporazione del solvente determina una graduale separazione allo stato solido del corpo disciolto. Tal corpo assume in questo processo forme regolari e nette; *cristallizza*, cioè, *per evaporazione del solvente*.

§ 76. **Freddo prodotto dall'evaporazione - Calore di vaporizzazione.** — Quando un liquido evapora assorbe calore, come si può provare versando un po' d'etere sulla mano (forte sensazione di freddo mentre l'etere evapora), o imbevendo d'etere un po' di cotone, avvolto attorno al bulbo di un termometro (rapido abbassarsi della colonna termometrica). Il fatto riceve numerose applicazioni. Citiamo per curiosità quella dell'« alcarazas », cui si riferisce la Fig. 58.

Si chiama *calore di vaporizzazione di un liquido, ad una temperatura determinata, il numero di calorie assorbito da un grammo del liquido*

(restando sempre costante la temperatura) *per trasformarsi in vapor saturo* a quella temperatura. Così il calore di vaporizzazione dell'acqua a 100° è la quantità di calore che si deve fornire ad 1 grammo di acqua, già scaldata a 100°, per trasformarlo in vapore saturo alla stessa temperatura.

Fig. 58. - L'acqua che trasuda dalle pareti porose di questo recipiente, evaporando, determina un raffreddamento che mantiene fresca l'acqua interna. È il noto alcarazas usato nei paesi meridionali.

Fig. 59.

Si pone il liquido in una fiala A, attraversata in basso da un tubo B, che a sua volta comunica inferiormente con un serpentino S, terminato da un tubo H rivolto in alto. Il vapore che si produce passa allora nel serpentino racchiuso in un vaso calorimetrico, di cui pc rappresenta l'equivalente in acqua. Nel calorimetro è contenuto un peso determinato M d'acqua alla temperatura t. In tale passaggio il vapore si condensa in R; condensandosi riscalda l'acqua del calorimetro, portandola dalla temperatura t ad un'altra superiore θ; valutato il peso P del vapore condensato e conoscendo la temperatura T di ebollizione del liquido e il suo calore specifico C, si potrà stabilire un'uguaglianza fra calore acquistato dal calorimetro e dall'acqua, e quello x ceduto dal vapore per condensarsi e per assumere la temperatura finale θ. Sarà cioè

$$(M + pc)(\theta - t) = Px + PC(T - \theta),$$

da cui

$$x = \frac{(M + pc)(\theta - t) - PC(T - \theta)}{P}.$$

Si è trovato in questo modo che il calore di vaporizzazione dell'acqua, quando l'ebollizione si fa a 100°, è di 537 calorie. Questo calore di vaporizzazione dipende dalla temperatura t, alla quale avviene la vaporizzazione stessa e precisamente diminuisce col crescere di t; esso è rappresentato dalla formola

$$606{,}5 - 0{,}695\, t \text{ calorie.}$$

§ 77. **Ebollizione.** — Se si scalda un liquido in un recipiente aperto, si nota dopo qualche tempo che, oltre alla evaporazione superficiale, si produce vapore anche nel fondo del recipiente, perchè si formano delle bolle che salgono continuamente in seno alla massa liquida. Sulle prime esse si dileguano per via, avanti di raggiungere la superficie liquida; poi riescono ad attraversare la superficie stessa e a diffon-

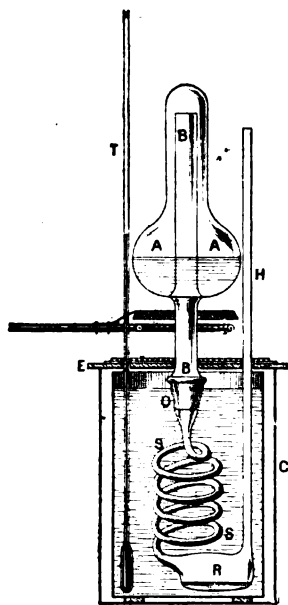
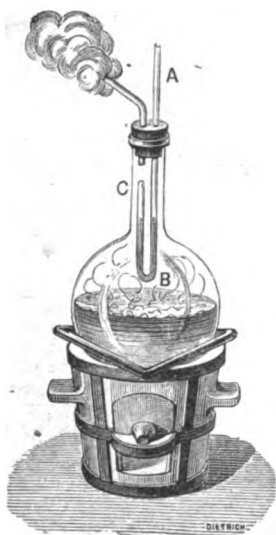



Fig. 60. - All'inizio della esperienza, nella parte sinistra del tubo *A* è posta una goccia d'acqua che si continua in mercurio nel ramo aperto. Portando il tutto alla temperatura di ebollizione dell'acqua, la goccia d'acqua evapora, e la tensione del vapore risulta (dall'uguaglianza del livello del mercurio nei due rami del tubo) uguale alla pressione atmosferica.

dersi nell'aria. Le bolle nell'attraversare il liquido lo mettono in agitazione o, come si dice, in sobbollimento; il fenomeno si chiama *ebollizione.*

Si può dimostrare molto facilmente che esso si produce allorquando il vapore (indub-

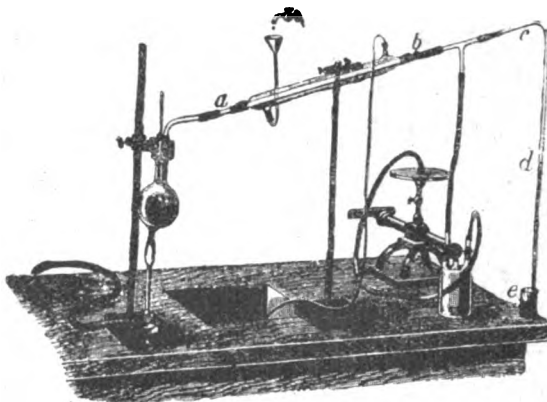



Fig. 61. - Apparecchio per dimostrare, che, alle varie pressioni gravanti sul liquido contenuto nel matraccio, realizzabili con una pompa in comunicazione col matraccio e misurabili col manometro *d*, corrisponde temperatura di ebollizione varia. Il tubo di comunicazione fra matraccio e pompa è ascendente e circondato da un manicotto entro cui circola acqua fredda che condensa il vapore formatosi obbligandola a ritornare nel matraccio.

biamente saturo) che si forma e si dilàta nell' inevitabile (§ 82) strato d'aria interposta fra il liquido ed il fondo del recipiente, ha raggiunto la tensione, atta a vincere la pressione gravante sul liquido.

Bisognerà quindi che il sistema sia portato alla temperatura richiesta, affinchè il vapor saturo del liquido abbia una tensione equivalente alla pressione che grava sul liquido stesso. Inoltre si avrà che se questa pressione cresce dovrà portarsi il liquido a temperatura più elevata per ottenere l'ebollizione; mentre se la pressione non muta la temperatura per la ebollizione rimarrà la stessa. Tutto questo si trova compendiato nelle leggi della ebollizione che sogliono enunciarsi così:

1. Un liquido qualunque, soggetto alla pressione normale dell'atmosfera, bolle ad una temperatura determinata, caratteristica del liquido stesso, detta *temperatura o punto di ebollizione.*

2. Durante la ebollizione la temperatura del liquido che bolle si mantiene costante.

3. Un aumento di pressione determina un innalzamento della temperatura di ebollizione del liquido; mentre un abbassamento di pressione, determina un abbassamento del punto di ebollizione.

L'influenza della pressione sulle temperature di ebollizione può mettersi in evidenza con la seguente esperienza dovuta al Franklin. Si fa bollire in un pallone l'acqua per un certo tempo, allo scopo di espellere la maggior parte dell'aria contenuta nel pallone; si toglie il pallone dal fuoco, lo si chiude con un tappo e, onde rendere più ermetica la chiusura ed impedire l'introdursi di aria, lo si capovolge e se ne immerge

l'estremità del collo in un vaso contenente dell'acqua bollita. L'ebollizione cessa dopo qualche istante, in causa del raffreddamento subìto dal liquido. Se allora si versa dell'acqua fredda sul pallone, o meglio ancora, se si applica alla sua superficie del ghiaccio, l'ebollizione ricomincia e può continuare per un tempo abbastanza lungo.

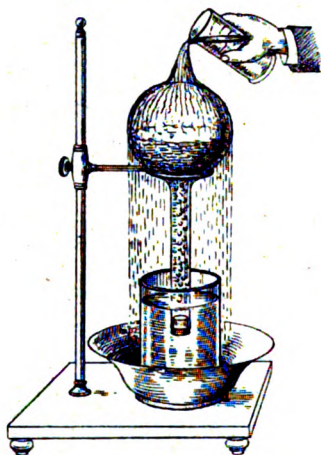



Fig. 62. - Ebollizione dell'acqua al disotto di 100° quando si diminuisca la pressione al disopra del liquido raffreddando il vapore che vi si trova.

Questo fatto si spiega facilmente: il contatto con acqua fredda o con ghiaccio diminuisce la tensione del vapore che preme la superficie del liquido, ed in queste nuove condizioni di pressione il liquido ha temperatura sufficiente per bollire. Si può utilizzare il fatto del variare della temperatura di ebollizione di un liquido, in seguito alla variazione di pressione, per la misura delle pressioni (§ 79).

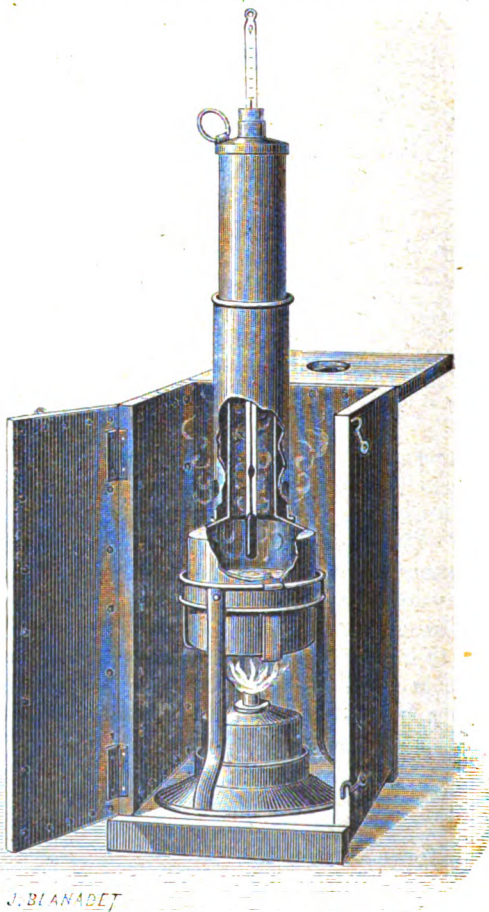



Fig. 63. - L'ipsometro. Dalla temperatura di ebollizione dell'acqua che con un fornello a spirito si fa bollire nel recipiente metallico, si desume la pressione dell'atmosfera e quindi l'altitudine del luogo di esperimento.

§ 78. **Ebollizione delle soluzioni.** — In un liquido la temperatura di ebollizione non viene alterata dalle sostanze che vi sono meccanicamente sospese; mentre invece subisce un'alterazione quando vi siano disciolte o combinate; più in generale: *le soluzioni dei corpi solidi, non volatili, bollono a temperatura più elevata del solvente puro.* Si ha cioè un innalzamento nella temperatura di ebollizione d'un liquido puro, allorchè vi si scioglie un corpo. L'innalzamento, per le soluzioni diluite, è proporzionale alla concentrazione (come per il caso della solidificazione delle soluzioni); inoltre, *sciogliendo in una*

stessa qualità e quantità di solvente una grammo-molecola d'un corpo qualsiasi, si ottiene sempre un uguale innalzamento nella temperatura di ebollizione.

Come per la solidificazione si definì l'abbassamento molecolare, analogamente si può definire l'*innalzamento molecolare del solvente*, riferendoci a *un* grammo di esso. Si ottiene così un numero caratteristico del solvente e indipendente dal corpo disciolto. Indicandolo con H, abbiamo

$H =$ 520 per l'acqua
2490 » il benzólo
1151 » l'alcool.

Vale anche qui la stessa osservazione fatta al § 48, a proposito della solidificazione delle soluzioni.

§ 79. **Ipsometro.** — La temperatura di ebollizione è molto sensibile alle variazioni di pressione, tanto che con l'elevarsi in montagna al disopra del livello del mare, si notano marcate variazioni nella temperatura di ebollizione dell'acqua. Questa naturalmente bolle ad una temperatura tanto minore dei 100°, quanto più ci eleviamo. Sulle cime del Monte Bianco l'acqua bolle a soli 84°, così che non vi si può render sodo un uovo per quanto lo si lasci nell'acqua bollente.

Poichè la temperatura di ebollizione è legata alla pressione atmosferica, e questa, come ben sappiamo, è legata all'altitudine, si può, in base alla determinazione della temperatura alla quale bolle l'acqua in un luogo, dedurre il valore dell'altitudine di questo. L'operazione si compie in viaggio con l'apparecchio rappresentato dalla Fig. 63 e chiamato *ipsometro*. È questo una piccola caldaia, entro cui si fa bollire, mediante una lampada a spirito, acqua, di cui si legge con opportuno termometro la temperatura di ebollizione.

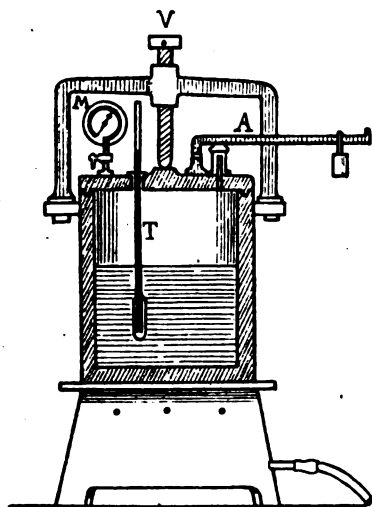
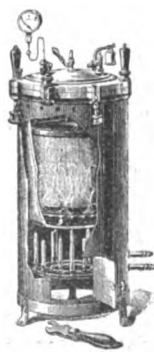



Fig. 64.

§ 80. **Pentola del Papin - Autoclave.** — Abbiamo veduto che se si scalda l'acqua in un recipiente chiuso, capace di resistere ad elevate pressioni, si realizzano pressioni di più in più forti e si raggiungono temperature superiori a 100°, che è il punto di ebollizione dell'acqua, costante se il riscaldamento ha luogo in recipienti aperti.

Fig. 65.

Codesti fatti sono largamente utilizzati.

Come vedremo, nelle macchine a vapore si deve utilizzare il vapor acqueo a forte pressione, effettuando il riscaldamento dell'acqua in recipienti chiusi (caldaie, generatori di vapore).

Similmente si opera allorchè si vuol sottoporre qualche sostanza all'azione dell'acqua, riscaldata al disopra dei 100°.

Per esempio, volendo estrarre la gelatina dalle cartilagini, dai tendini, dalle ossa, si assoggettano questi corpi ad un riscaldamento prolungato nell'acqua. Alla temperatura di 100° l'operazione richiederebbe un tempo lunghissimo, invece la si compie in breve, adoperando un recipiente chiuso, e portando la temperatura ai 120°, cui corrisponde una pressione di due chilogrammi circa per cmq.

Si usa a tal fine un recipiente qual'è quello rappresentato dalla Fig. 64 detto *pentola* (o marmitta) *del Papin*, perchè inventata, allo scopo di provvedere gelatina agli ammalati degli ospedali, dal medico francese Dionigio Papin, morto nel 1710.

Si chiama anche « digestore », perchè l'operazione dell'estrarre la gelatina dalle ossa è espressa volgarmente dalla locuzione: « digerire le ossa ».

Anche la preparazione del brodo concentrato vien di molto abbreviata con l'uso di una pentola di Papin, la quale permette inoltre la completa estrazione dei principî attivi, che debbono entrare nel brodo, per renderne migliore la qualità.

Recipienti simili in tutto alla pentola del Papin, sono quegli apparecchi che ricevono il nome di *autoclavi* (Fig. 65), usati nelle industrie per certi lavori, come, ad esempio, la « saponificazione » dei corpi grassi; e negli ospedali per la « sterilizzazione » del materiale usato nelle operazioni chirurgiche, vale a dire per la uccisione di tutti i microrganismi patogeni eventualmente contenuti nel materiale stesso. Basta che il manometro, annesso all'autoclave entro cui furon posti gli oggetti da sterilizzare, segni un eccesso di pressione di un chilogrammo sulla pressione atmosferica, per essere sicuri che la temperatura da essi raggiunta è di 120° e che a partire da tale momento la sterilizzazione riesce perfetta in 15-30 minuti, a seconda del volume del liquido contenuto nei singoli recipienti.

§ 81. **Principio di Watt.** — Se si raffredda fino alla temperatura di θ° una parte soltanto della superficie d'un recipiente contenente un vapor saturo, alla temperatura di t° e dotato di una forza elastica F_t, l'esperienza mostra che la forza elastica del vapore non sarà più (dopo il raffreddamento) F_t, ma minore e precisamente F_θ, valore della tensione massima alla temperatura più bassa θ. L'enunciato di questo fatto sperimentale, verificato in ogni caso, costituisce il cosidetto *principio della parete fredda o di Watt.*

§ 82. **Ritardo all'ebollizione e ritorno alla spiegazione della ebollizione.** — Il fenomeno della ebollizione presenta delle anomalie, che richiamano in certa guisa quelle della solidificazione. Se si fa bollire per parecchio tempo un liquido in un recipiente di vetro, ad esempio, si constata che l'ebollizione diviene di più in più difficile, le bolle di vapore che si formano non partono più che da qualche punto della parete del vaso e la temperatura del liquido può elevarsi notevolmente al disopra di quella d'ebollizione, senza che l'ebollizione avvenga.

Allorchè un liquido è così condotto ad una temperatura superiore al suo punto di ebollizione, senza bollire, si dice che è in istato di *soprariscaldamento*, ovvero che è *soprariscaldato*.

Il soprariscaldamento cessa qualora si getti nel liquido un corpo solido, e l'ebollizione ricomincia con svolgimento di bolle che si formano intorno al corpo solido aggiunto.

Numerose esperienze di Dufour, di Donny, di Gernez, eseguite in proposito, condussero a spiegare pienamente questo fatto, costituente a tutta prima un'anomalia alle leggi dell'ebollizione, e ad interpretare nettamente il fenomeno dell'ebollizione. Esso non può prodursi se fra il liquido che deve bollire e la parete del recipiente (o la superficie d'un corpo immerso) non esista uno strato d'aria, che consenta una vaporizzazione, la quale naturalmente avverrà con formazione di vapore saturo. Quando, coll'elevarsi graduale della temperatura del liquido, la tensione massima del vapor saturo formatosi sarà tale da vincere la pressione esterna gravante sul liquido, si inizierà la ebollizione.

Si dimostra difatti, come abbiamo detto, che la temperatura di ebollizione di un liquido, soggetto ad una certa pressione, coincide colla temperatura alla quale la tensione massima del suo vapore ha raggiunto lo stesso valore della pressione gravante sul liquido. Può servire a tal fine l'apparecchio della Fig. 61.

Fig. 66. - Esperienza di Gernez. Il sovrariscaldamento (riscaldamento al disopra della temperatura di ebollizione) di un liquido cessa appena vi si introduce una piccola quantità d'aria che diventa l'origine di bolle di vapore.

§ 83. **Calefazione.** — Anche il fenomeno della *calefazione* sembra presentare un'eccezione alle leggi dell'ebollizione. Scaldiamo al rosso vivo una laminetta di ferro o di rame e versiamo una grossa goccia d'acqua sulla superficie metallica così arroventata (Fig. 67).

Fig. 67. - Calefazione dell'acqua. Quando una goccia d'acqua è versata su di una lastra portata al rosso, essa mantiene la forma globulare ed evapora lentamente senza toccar la lastra.

Dovremmo aspettarci una ebollizione estremamente rapida. Ciò non avviene. L'acqua vi si mantiene in forma d'una lente più o meno grossa che scorre qua e là, rimpicciolendosi a poco a poco.

Quando si esamina il fenomeno più da vicino, si vede che la lente non tocca il metallo e si trova che la temperatura del globulo liquido è sempre inferiore al punto di ebollizione del liquido stesso.

Queste due circostanze rendono conto del meccanismo del fenomeno. La goccia di liquido, giungendo sulla superficie riscaldata, si trova subito superficialmente portata ad una temperatura così alta, da causare un'attivissima evaporazione. I vapori prodotti formano allora una

specie di cuscinetto, che separa la goccia dalla superficie calda e che, come impedisce il contatto fra liquido e superficie, impedisce la comunicazione di calore all'interno del liquido. È codesto strato di vapore che con la sua produzione continua provoca (sviluppandosi) i movimenti della sfera liquida.

Qualora la temperatura della superficie calda si abbassi al disotto di un certo limite (140° per l'acqua) la pressione del vapore emesso dal globulo non è più sufficiente a mantenere distacco fra liquido e superficie calda; il contatto, che per questo si effettua, dà quindi origine ad una brusca evaporazione di tutta la massa liquida.

È un fenomeno di calefazione che utilizza la stiratrice nel modo a tutti noto, per giudicare se il ferro che essa intende adoperare sia o no a temperatura elevata.

§ 84. **Densità dei vapori.** — Dicesi *densità (peso specifico) di un vapore* - come per un gas - il rapporto fra la sua massa (o il suo peso) e la massa (o il peso) di un volume uguale di aria, nelle stesse condizioni di temperatura e di pressione:

$$d = \frac{M}{M'} = \frac{P}{P'}.$$

Varrà quindi per i vapori la formola (12) del § 35. Considerando per a_o il centimetro cubo ed essendo di gr. 1,293 il peso di un litro di aria secca, a 0° e 760 mm. di pressione, sarà

$$a_o = 0{,}001293,$$

valore che sostituito nella ricordata formola, permette di ricavare:

$$d = \frac{P}{0{,}001293\, V} \quad \frac{760\,(1+\alpha t)}{H}. \qquad (22)$$

La densità di un vapore dipende, in generale, dalle condizioni t ed H. Aumenta con H e diminuisce quando t aumenta. A partire da una certa temperatura essa diventa però sensibilmente costante. Questo valore limite, verso il quale tende la densità di un vapore a mano a mano che ci si allontana dalla sua saturazione, si chiama *densità limite* o *teorica* ed è quello che si impiega in chimica per il calcolo dei pesi molecolari. Per il vapor d'acqua essa ha il valore 0,622. Invece di questo si usa frequentemente nei calcoli il valore di $^5/_8$, che differisce di poco da esso.

§ 85. **Sublimazione.** — Un certo numero di corpi solidi, già lo si disse, passano all'aria libera (per una conveniente temperatura) allo stato di vapore direttamente, senza attraversare lo stato liquido.

Per rendersi conto della possibilità del fenomeno, detto di *sublimazione*, supponiamo che un corpo determinato possa dare origine ad un vapore, avente una pressione massima di 1 atmosfera ad una temperatura per la quale conservi ancora lo stato solido; il corpo portato all'aria libera ed a questa temperatura passerà interamente dallo stato solido a quello aeriforme. È una specie di ebollizione del corpo solido.

Se la temperatura di sublimazione è inferiore a quella circostante, il solido (caso dell'anidride carbonica solida, avente come temperatura di sublimazione -78°), abbandonato a sè stesso, assume questa temperatura e vaporizza. Se, al contrario, la temperatura di sublimazione è superiore a quella ambiente (caso dell'arsenico, che ha per temperatura di sublimazione 400°), il corpo non sublima altro che se si scalda. Analogamente si comporta l'anidride arseniosa, la cui temperatura di sublimazione è superiore a 400°. (Vedi anche più avanti al § 93).

Frequente è il fatto inverso del passaggio diretto dallo stato aeriforme al solido; anche esso riceve il nome di sublimazione. Quando un vapore sublima, il solido che ne risulta assume forma cristallina.

I recipienti contenenti la canfora hanno le pareti tappezzate da piccoli cristalli di questa sostanza, dovuti alla cristallizzazione dei vapori di essa.

§ 86. **Condensazione dei vapori e dei gas.** — Si sa che se si comprime un vapore e lo si raffredda, si finisce per renderlo saturo, ed allora una diminuzione del volume od un abbassamento della temperatura anche piccoli determinano il ritorno di una parte del vapore allo stato liquido.

Il fenomeno si chiama *condensazione*. Ognuno l'ha osservato raccogliendo il vapore acqueo che si eleva da una pentola su di un piatto freddo, o trasportando in ambiente caldo una caraffa di acqua fredda. In quest'ultimo caso si deposita in goccioline sulla parete esterna della caraffa parte del vapore acqueo diffuso nell'ambiente.

Fig. 68. - Il calore sviluppato nella condensazione del vapor acqueo prodotto nel pallone riscaldato, riscalda l'acqua contenuta nel bicchiere ove si fa arrivare il vapore medesimo. Siffatto riscaldamento è attestato dal termometro immerso.

Come la evaporazione di un liquido determina un assorbimento di calore e quindi un abbassamento di temperatura tutt'intorno, così la condensazione di un vapore determina uno sviluppo di calore e quindi un innalzamento di temperatura.

Un grammo di vapore saturo passando, senza cambiamento di temperatura, dallo stato di vapore allo stato liquido libera anzi una quantità di calore detta *calore di liquefazione*, uguale al calore di vaporizzazione dello stesso corpo. Intendesi quindi per *calore di liquefazione* di un aeriforme sotto una pressione data, il numero di calorie che vengono emesse da un grammo di esso, soggetto a quella pressione, per trasformarsi in liquido senza aumento di temperatura.

Questo innalzamento di temperatura, è anzi molto frequentemente usato nell'industria, quando per riscaldare certi liquidi si inietta direttamente in essi del loro vapore. Questo processo ha il vantaggio, spesso prezioso, di agitare vivamente il liquido riscaldandolo. Del pari, come vedremo, si utilizza il calore sviluppato dalla condensazione del vapore, nel riscaldamento di grandi stabilimenti, come officine, scuole, ospedali, alberghi ecc. Sul calore di condensazione è fondato il procedimento estremamente rapido che impiegano le compagnie delle strade ferrate

per riscaldare i recipienti di riscaldamento dei vagoni. I recipienti di riscaldamento, quasi pieni di acqua, sono posti verticalmente sopra un carrello, ordinariamente in numero di 50. Si spinge il carrello presso ad una caldaia a vapore; cinquanta tubi che si affondano nei recipienti, mandano una corrente di vapore, ed elevano in pochi minuti la temperatura fino a 100°.

§ 87. **Distillazione.** — La possibilità di condensare i vapori, e insieme il fatto che, allorquando si fa evaporare una soluzione, passa allo stato di vapore il solo solvente, sono utilizzati nella separazione del solvente dal corpo disciolto, o, ciò che torna lo stesso in certi casi, nella purificazione di un dato liquido.

Se si prende, ad esempio, dell'acqua naturale, che è acqua pura contenente in soluzione vari corpi, la si fa bollire e si fa poi condensare il vapore che si forma in un recipiente adatto, mantenuto a bassa temperatura, in esso si raccoglie dell' acqua chimicamente pura.

Fig. 69. - Il vapore di acqua o di alcool che si sviluppa in A va a condensarsi nel serpentino E mantenuto freddo da una circolazione continua di acqua fredda, e l'acqua o l'alcool condensato si raccoglie in H.

Il processo si chiama *distillazione*, e l'acqua pura così ottenuta si dice *distillata*.

Nell'industria l'operazione si effettua in un apparecchio detto *alambicco*. L'acqua da evaporare si pone nella caldaia e il raffreddamento del vapore si compie durante il suo passaggio attraverso ad un tubo piegato a spirale (serpentino) circondato da acqua sempre fredda per continua rinnovazione (Fig. 69).

L'alambicco più o meno modificato serve anche a separare gli uni dagli altri liquidi inegualmente volatili.

Se i due liquidi A e B hanno temperature di ebollizione alquanto distanti, 50° e 100° per esempio; scaldando a 50° evaporerà il liquido A, del cui vapore potrà ottenersi la condensazione, e scaldando poi a 100° si avrà il vapore del corpo B, che potrà venir esso pure condensato.

Se i due liquidi mescolati che si scaldano hanno temperatura di ebollizione non molto distanti; se si tratta per esempio di un miscuglio di acqua e di alcool; l'alcool più volatile dell'acqua evaporerà dapprima quasi solo e poi in miscela con acqua, ma il prodotto evaporato conterrà in grande prevalenza alcool e il residuo alla fine sarà acqua pressochè pura.

Distillando e ridistillando più volte successivamente il prodotto evaporato, si potrà finalmente ottenere alcool quasi privo di acqua.

Il metodo è detto di *distillazione frazionata* e serve largamente nell'industria, oltrechè nelle ricerche scientifiche. Si ricorre, per esempio, a tal metodo per separare l'alcool dai prodotti di fermentazione, ai quali

è associato; per separare i diversi residui, tanto importanti, della distillazione del carbon fossile; ed in mille e mille altri casi.

§ 88. **Liquefazione dei gas - Temperatura critica.** — Come si può condensare, sia per raffreddamento, sia per compressione, un vapore; si può o coll'una o coll'altra soltanto di siffatte operazioni, determinare la liquefazione di quegli aeriformi detti *gas*, nelle condizioni normali di temperatura e di pressione?

Alla domanda si può rispondere ormai nel modo più semplice.

Certi gas si possono liquefare per semplice raffreddamento, altri per semplice compressione, ma in generale occorre associare le due azioni. In ogni caso, per la liquefazione occorre che la compressione si compia sul gas portato al di sotto di una certa temperatura, diversa ma caratteristica per i diversi gas, detta *temperatura critica*.

Quest'ultima nozione è stata acquisita alla scienza dal fisico inglese Andrews, ed è conseguenza di una legge di capitale importanza detta appunto « legge di Andrews ». Costituisce essa la generalizzazione di un primo risultato ottenuto dal distinto sperimentatore inglese su di un gas detto *anidride carbonica*. L'Andrews vide difatti per questo gas — e cosa analoga fu poi veduta per gli altri — che se si trova ad una temperatura inferiore a 31° è sempre possibile liquefarlo per compressione, mentre ad una temperatura superiore a 31° è impossibile liquefarlo, qualunque sia la pressione di cui si dispone. Se ne concluse (legge di Andrews) che esiste per ogni gas una temperatura detta *critica*, al disopra della quale non è possibile far passare il gas allo stato liquido, qualunque sia la pressione alla quale lo si assogetti. Ecco la temperatura critica di qualche gas:

Anidride solforosa	+ 156°	Ossigeno	— 116°
Ammoniaca	+ 130°	Ossido di carbonio	— 140°
Anidride carbonica	+ 31°	Azoto	— 145°
Etilene	+ 9°	Idrogeno	— 241°

È chiaro che gas come i primi quattro di questa tabella si trovano naturalmente, nelle condizioni ordinarie, già al di sopra della loro temperatura critica, epperò si possono liquefare colla sola azione della compressione. Gas invece come gli ultimi quattro, che hanno la temperatura critica di molto inferiore a 0°, richiedono dei raffreddamenti considerevoli per essere liquefatti. Gli ultimi quattro gas e pochi altri erano anzi ritenuti come non liquefacibili o *permanenti*, prima che si conoscesse la legge di Andrews, dalla quale risulta che un raffreddamento conveniente rende possibile anche la liquefazione dei gas più restii.

Coll'uso di efficaci mezzi di raffreddamento si son potuti ora liquefare gli aeriformi meno cedevoli o, come dicevano un tempo, meno *coercibili*, designandosi pel passato con questo nome i gas che si potevano liquefare.

§ 89. **Produzione delle basse temperature.** — Vari sono i mezzi che consentono di ottenere le basse temperature per la liquefazione dei gas. Essi possono raggrupparsi come segue: *a*) miscele frigorifere; *b*) evaporazione rapida di un liquido; *c*) espansione del gas.

Miscele frigorifere. — Esse sono poco usate in quanto danno deboli abbassamenti di temperatura e non possono servire che per gas a temperatura critica non troppo bassa.

Evaporazione rapida. — La semplice evaporazione, dicemmo, produce freddo; tanto più quanto più è rapida. La rapida evaporazione nel vuoto di parte dell'acqua contenuta in *a* (specialmente se aiutata dall'assorbimento di vapore, effettuato dall'acido solforico contenuto in *b*) fa congelare la parte residua entro la capsula. Ma meglio può utilizzarsi la vaporizzazione per ebollizione.

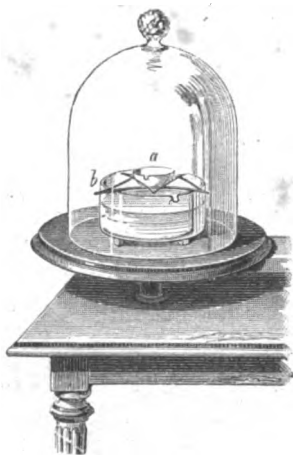



Fig. 70.

Fig. 71.

Sotto la pressione dell'atmosfera la temperatura di ebollizione è - 8° per l'anidride solforosa, - 38° per l'ammoniaca, - 104° per l'etilene ecc.; a pressioni più basse, le temperature di ebollizione discendono ancora più.

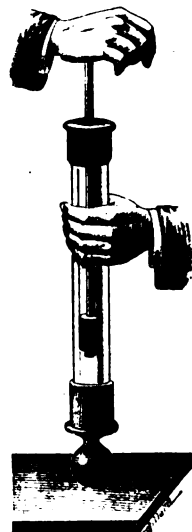
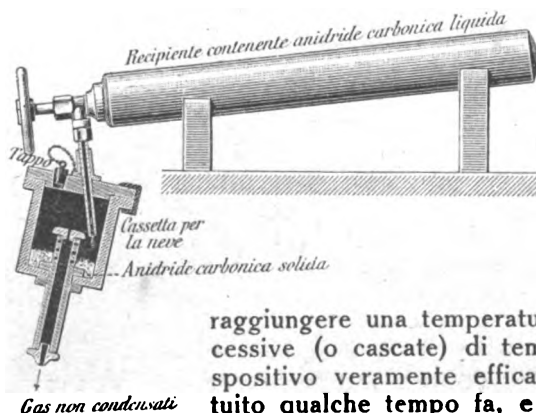
Supponiamo allora che si sia liquefatta una certa quantità di etilene; lasciandola bollire in un vaso, sotto una campanella quale si mantenga una debole pressione per mezzo di una macchina pneumatica, la temperatura del liquido si manterrà al disotto di - 104°. Questo liquido potrà quindi servire di refrigerante per la liquefazione dell'ossigeno, il cui punto critico è di - 116°; basta comprimere l'ossigeno in un tubo di vetro resistente, immerso nel bagno di etilene liquido, bollente sotto debole pressione, per preparare una certa quantità di ossigeno liquido. Questo, bollendo sotto la pressione atmosferica a - 181° e nel vuoto a - 200°, può venire a sua volta impiegato come refrigerante per liquefare l'azoto e così di seguito.

Si comprende per tal modo il funzionamento del dispositivo rappresentato schematicamente dalla Fig. 73, che permette di raggiungere una temperatura bassissima per cadute successive (o cascate) di temperatura. Costituisce un dispositivo veramente efficace, al quale però si è sostituito qualche tempo fa, e associato più di recente, il metodo di raffreddamento per espansione.

Recipiente contenente anidride carbonica liquida
Tappo
Cassetta per la neve
Anidride carbonica solida
Gas non condensati

Fig. 72

Espansione. — L'espansione adiabatica di un gas consiste nella diminuzione brusca della pressione alla quale è sottoposto, senza ces-

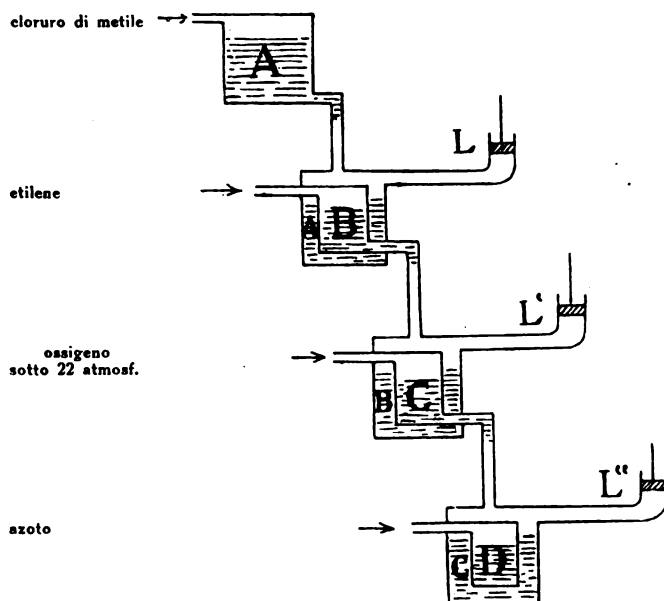



Fig. 73. - Disposizione schematica di una cascata di temperatura. L'evaporazione rapida del cloruro di metile nel vuoto prodotto da una macchina pneumatica *L* dà una temperatura di - 55°, sufficiente a permettere la liquefazione dell'etilene sotto la pressione di qualche atmosfera. Un bagno di etilene evaporato a sua volta nel vuoto prodotto dalla pompa *L'* dà la temperatura di - 136° che consente la liquefazione dell'ossigeno sotto la pressione di 22 atm. L'evaporazione dell'ossigeno nel vuoto prodotto dalla pompa *L''* dà la temperatura di - 200° che permette la liquefazione sotto la pressione atmosferica dell'aria e dell'azoto.

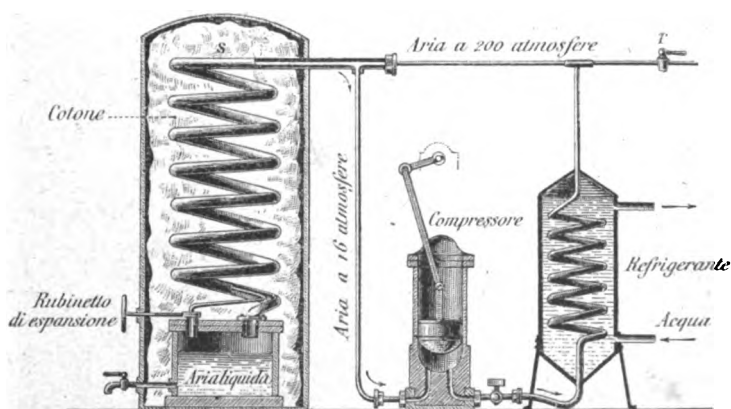



Fig. 74.

sione o sottrazione ad esso di calore. A tale processo corrisponde un abbassamento nella temperatura del gas che si espande; precisamente come si accompagna un riscaldamento alla compressione di un aeriforme (Fig. 71).

L'abbassamento di temperatura per espansione è tanto più grande quanto più questa è brusca. Si possono così realizzare abbassamenti di temperatura sino a - 200°; e si capisce che se questa temperatura è inferiore alla temperatura critica del gas che subisce l'espansione, può determinare la liquefazione di una parte del gas compresso.

Tale è il principio della macchina Linde (Fig. 74) per la liquefazione dell'aria, e di numerose altre macchine che di quella sono opportune modificazioni o saggi perfezionamenti.

Abbassamenti più forti di temperatura (a parità di espansione) si ottengono se il gas che si espande è costretto a vincere una marcata resistenza esteriore. Tale nozione è stata felicemente applicata da G. Claude (Fig. 75).

Fig. 75. - Il procedimento di liquefazione dell'aria di G. Claude. L'aria compressa dal compressore *B* circola sul tubo centrale *A*, si espande in *D* e si liquefà per gran parte raccogliendosi in *R*. Quella che non si liquefa ritorna per *C* al compressore che la rimette in circolo. Sin qui si tratta del dispositivo Linde ridotto in schema alla più semplice espressione. Ma mentre nel dispositivo Linde il compressore *C* deve portare l'aria alla pressione di 200 atmosfere, nel dispositivo Claude occorrono al massimo 40 atmosfere di pressione perchè in *D*, ove l'aria compressa si espande, essa è costretta a porre in azione un motore dal quale si può ritrarre, ad esempio, l'energia per porre in moto una dinamo e quindi è costretta a fare un *lavoro esterno*. E l'espansione con lavoro esterno produce un abbassamento di temperatura più rapido che senza lavoro esterno.

Combinando opportunamente il processo di espansione con quello di evaporazione rapida, si potè liquefare l'*elio*, elemento chimico che pareva resistere a tutti gli sforzi e che trovato da poco sulla Terra, qualche anno prima si riteneva esistere solamente nel Sole (da ciò il suo nome). Si raggiunse per tal modo una temperatura superiore di circa tre gradi allo zero assoluto.

Così progredisce la scienza, collo sforzo perseverante dei dotti laboriosi e sereni! « Verso le nove della sera — dice Kamerling Omnes nella relazione delle esperienze eseguite per la liquefazione dell'elio nel laboratorio di Leida da lui diretto — gli apparecchi e gli operatori erano giunti all'estremo grado di fatica e siccome non rimaneva più elio, si interruppe l'esperienza ». Essa venne però presto ripresa, l'elio fu liquefatto ed ora la produzione della temperatura di - 270° è nella pratica corrente del laboratorio frigorifero di Leida.

90. **Applicazioni dei gas liquefatti.** — I gas liquefatti sono molto largamente e variamente applicati.

Il cloro liquido è posto in commercio entro robusti recipienti di acciaio. Esso è così (assai più comodamente di un tempo) impiegato nell'industria, particolarmente in quella della carta.

L'anidride solforosa si vende sia in tubi di acciaio, sia in recipienti resistenti di vetro, simili ai sifoni per acqua di seltz e protetti da una rete metallica. Reso pertanto trasportabile e di impiego facile, questo corpo viene impiegato come disinfettante ed anche come decolorante (fabbrica-

zione dello zucchero, imbiancamento delle materie animali e vegetali ecc.).

L'anidride carbonica liquida, per le sue proprietà che la rendono tanto usata, si trova forse in maggiore abbondanza in commercio, entro recipienti resistenti di acciaio. La semplice manovra di un rubinetto permette la estrazione del liquido dal recipiente leggermente inclinato. Se si riceve il getto liquido in una cassetta di ebanite o più semplicemente in un sacco di feltro, l'espansione di una porzione del liquido produce la solidificazione della porzione rimanente. Si ha in tal modo la formazione della così detta *neve di anidride carbonica*, che è di un bellissimo color bianco e che può agglomerarsi per pressione.

Lapis di neve carbonica permettono l'applicazione del freddo a scopo medico. La mescolanza di neve carbonica con cloroformio, con etere, con cloruro di metile, permette di ottenere temperature di $-75°$, di $-90°$, di $-100°$; sistemi questi assai utilizzati nei laboratori per la produzione del freddo. Una mescolanza di neve carbonica e di etere fa solidificare molto facilmente il mercurio, portandolo ad uno stato tale, che consenta di martellarlo come il piombo.

L'anidride carbonica liquida è usata nell'industria principalmente per la preparazione e la conservazione della birra, per la fabbricazione delle bevande gassose e in moltissime altre operazioni.

L'evaporazione dell'ammoniaca liquida è utilizzata per produrre il freddo nelle macchine frigorifere impiegate in vario modo nell'industria (conservazione e trasporto delle carni, delle frutta, del burro ecc.).

Ma l'applicazione più recente ed in certo modo più ampia della liquefazione dei gas è la preparazione industriale dell'*aria liquida*.

L'aria liquefatta è un liquido trasparente mobilissimo. Non può essere conservato come altri gas liquefatti in serbatoi d'acciaio, perchè la comunicazione ad essa del calore esteriore, attraverso la parete metallica, ne eleverebbe rapidamente la temperatura sino al punto critico ed in breve diverrebbe completamente gassoso, 1 volume di aria liquida producendone 750 di gas a 0°. Il recipiente quindi non potrebbe in alcun modo sopportare la forte pressione del gas prodottosi.

Si mantiene l'aria liquida in recipienti speciali, dei quali sarà detto più avanti.

La temperatura dell'aria liquida soggetta alla pressione atmosferica ordinaria è assai bassa. Gettando in essa dell'alcool, questo, subito si solidifica in un fiocco solido. I metalli e anche le sostanze organiche, come fiori e carne, diventano fragilissimi. Il piombo diventa sonoro.

L'aria liquida è stata applicata in tutte quelle industrie che richiedono la produzione di basse temperature. La sua espansione si è utilizzata come forza motrice per muovere stantuffi in macchine perforatrici, e anche, sebbene in pochissimi casi, nell'automobilismo. Si è cercato pure di applicarla nella fabbricazione di cartucce esplosive mescolandola ad altro corpo opportuno ed imbevendo della miscela pezzetti di marna.

Ma la più preziosa applicazione della produzione industriale dell'aria liquida sembra la possibilità di estrazione rapida e comoda dell'ossigeno dall'aria, che è un miscuglio principalmente costituito da ossigeno e da azoto. Il miscuglio di ossigeno e di azoto liquefatti, abbandonati a sè alla pressione atmosferica, entra in ebollizione. L'azoto evapora prima (bolle a $-195°,5$ sotto la pressione atmosferica; mentre l'ossigeno bolle nelle

stesse condizioni a - 183°) e il miscuglio si arricchisce così di più in più in ossigeno. Al termine di pochi istanti rimane dell'ossigeno liquido puro.

CAPITOLO VIII.

EQUILIBRIO FRA STATI FISICI DIFFERENTI DI UN MEDESIMO CORPO IN CONTATTO.

§ 91. **Equilibrio fra stati fisici differenti di un medesimo corpo.** — Nei precedenti capitoli ci siamo occupati delle condizioni da realizzare, per ottenere la trasformazione di un corpo da uno stato fisico in un altro.

Occupiamoci ora rapidamente delle condizioni per le quali, avendo a contatto, o, come si dice, in presenza, stati fisici differenti di un medesimo corpo, non si verifichi cambiamento di uno degli stati in un altro.

Diremo che due stati fisici di un corpo o tutti e tre sono in equilibrio quando possono coesistere a contatto, senza trasformazione di uno di essi in un altro.

Perchè due stati fisici di un medesimo corpo siano in equilibrio, occorre una reciproca pressione, dipendente soltanto dalla natura del corpo e dalla temperatura. Tale pressione cresce in generale (esistono casi d'eccezione) con la temperatura.

Perchè i tre stati fisici di un corpo siano in equilibrio occorrono una pressione ed una temperatura determinate, le quali dipendono solo dalla natura del corpo.

§ 92. **Curve di equilibrio e punto triplo.** — Si può quindi formare per ogni corpo un diagramma, quale è quello della Fig. 76 relativa all'acqua.

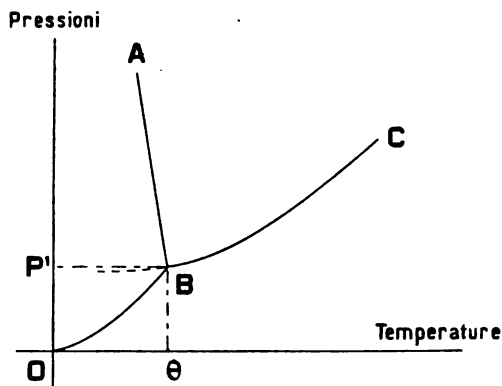



Fig. 76.

In esso la curva BC rappresenta la variazione della pressione con la temperatura nell'equilibrio fra lo stato liquido e lo stato aeriforme; le curve AB e OB rappresentano la stessa cosa rispettivamente per i due stati solido e liquido, solido ed aeriforme; il punto B (detto *punto triplo*), che necessariamente deve trovarsi sul punto d'incontro delle tre curve, rappresenta le condizioni di equilibrio per i tre stati.

§ 93. **Caso della sublimazione.** — Risulta dal grafico (Fig. 76) che, scaldando un corpo al disopra della temperatura θ, se si ha cura di

mantenere la pressione al disotto del valore P' per eliminazione del vapore prodotto, il solido passerà allo stato aeriforme senza passare attraverso allo stato liquido.

È il caso della *sublimazione* quando il fenomeno si verifichi per riscaldamento del corpo all'aria libera (perchè il vapore non assuma pressione superiore alla pressione atmosferica). Affinchè ciò avvenga occorre evidentemente che la pressione corrispondente al punto triplo sia per il corpo superiore a 760 mm. di mercurio. L'arsenico, l'acido arsenioso ecc., sono in questo caso. Per ottenerli allo stato liquido basta aumentare la pressione.

CAPITOLO IX.

PROPAGAZIONE DEL CALORE.

§ 94. **I vari modi di propagazione del calore.** — Il calore si propaga con vario meccanismo: 1° per irraggiamento; 2° per conduzione; 3° per convezione.

IRRAGGIAMENTO.

§ 95. **Irraggiamento del calore - Etere cosmico.** — Un processo di propagazione del calore che mette bene in rilievo la stretta relazione di origine fra il calore e la luce è quello detto per *irraggiamento*. Si effettua anche attraverso al vuoto, come lo può attestare (Fig. 77) un termometro collocato nel centro di un pallone di vetro evacuato e posto in prossimità di una sorgente calorifica; ed è la maniera di propagazione seguìta dal calore solare, che ci giunge attraverso gli spazi interplanetari nello stesso tempo che la luce. Si ritiene operata per moto ondulatorio trasversale di un particolare mezzo, detto *etere cosmico* o semplicemente *etere*, diffuso per tutto l'Universo ed infiltrato anche fra le molecole dei corpi. Si deve avvertire che la esistenza dell'etere si ammette per ipotesi. Il calore che si propaga per irraggiamento si chiama *calor raggiante* e possiede le proprietà caratteristiche di non riscaldare molto i corpi che attraversa e di diffondersi in ogni direzione rettilinea tutt'intorno alla sua sorgente. *Raggio calorifico* si chiama ognuna delle direzioni rettilinee di propagazione.

Fig. 77. - Il calor raggiante va a riscaldare il termometro *a* attraverso al vuoto torricelliano.

§ 96. **Legge di Newton.** — Corpi caldi qualunque irradiano o, come talora si dice, emettono calore nel raffreddarsi. Le prime considerazioni intorno alla perdita di calore per irraggiamento si trovano nelle opere del Newton.

Questi, ammette senz'altro che un corpo riscaldato soggetto ad una causa costante di raffreddamento perda in ogni istante una quantità di

calore proporzionale all'eccesso della sua temperatura su quella dell'aria ambiente; il che conduce alla legge: *gli eccessi di temperatura del corpo sull'ambiente decrescono in progressione geometrica, quando i tempi crescono in progressione aritmetica.*

§ 97. **Poteri emissivo, diatermano, riflettente, diffusivo ed assorbente.** — La quantità di calore che i vari corpi scaldati ad una medesima temperatura emettono a parità di superficie, varia al variare delle loro condizioni superficiali, al variare della natura loro e della loro temperatura. Inoltre, come varie sorgenti di luce danno luci variamente colorate, i vari corpi caldi emettono calore raggiante vario. Il nero fumo è il corpo che emette, a parità di tutte le altre condizioni, la maggior quantità di calore di tutti. Per dimostrazioni sperimentali sull'argomento si usa un termoscopio, costituito da un recipiente le cui regioni estreme, collegate da un tubo piegato ad U, sono sferiche. Il recipiente contiene nella sua parte inferiore un liquido colorato che si sposta verso un bulbo quando si riscaldi l'altro. Questo è annerito per meglio assorbire il calore raggiante. Il termoscopio può usarsi con profitto in varie forme, per varie esperienze sul calor raggiante. Si chiama *potere emissivo* di un corpo la quantità di calore irradiata dall'unità di superficie del corpo stesso.

Frequentemente si considera il *potere emissivo* del corpo *relativamente al nero fumo* e precisamente il rapporto fra la quantità di calore che emette la unità di superficie del corpo e la quantità di calore che emette, alla stessa temperatura, l'unità di superficie di nero fumo.

Noi qui ci riferiamo alla *emissione totale* del corpo, cioè alla quantità di calore irradiata nell'insieme delle radiazioni che esso emette. Tale emissione totale E, per un determinato corpo, è legata alla temperatura assoluta T di questo dalla relazione:

$$E = kT^{\alpha}, \qquad (23)$$

nella quale k ed α sono costanti.

Si dimostra che per i vari corpi α ha valori compresi fra 4 e 5.

Corrispondentemente, per i corpi pei quali α ha valore prossimo a 4, rispetto ai corpi pei quali esso ha valore prossimo a 5, k ha maggior valore, dimodochè a parità di temperatura la emissione risulta più intensa.

Il potere emissivo del nero fumo è evidentemente uguale ad 1. Sensibilmente uguale ad 1 è anche il potere emissivo della biacca.

Il potere emissivo dei metalli levigati è piccolissimo; mentre è grande il potere emissivo dei corpi di colore scuro in genere, e piccolo quello dei corpi di color bianco o biancastro.

Alcuni corpi si lasciano traversare facilmente dal calore raggiante, altri difficilmente. I primi si chiamano *diatermani* e gli altri *atermani.*

Il salgemma, il più diatermano dei corpi solidi, lascia passare in media il 92 per cento del calore che riceve.

L'aria secca, ed in generale i gas secchi sono molto diatermani.

Il vetro, l'allume ed il vapore acqueo sono diatermani per la maggior parte dei raggi calorifici (quelli emessi da corpi caldi luminosi), ed atermani per altre specie di raggi (in generale quelli emessi da corpi caldi non luminosi).

Fig. 78. - Termoscopio a liquido costituito da un recipiente le cui regioni estreme, collegate da un tubo piegato ad *U*, sono sferiche. Il recipiente contiene nella sua parte inferiore un liquido colorato che si sposta verso l'alto nel ramo destro del tubo quando si riscaldi il bulbo inferiore. Questo è annerito per meglio assorbire il calore raggiante. Questo termoscopio può usarsi con profitto per varie esperienze sul calor raggiante.

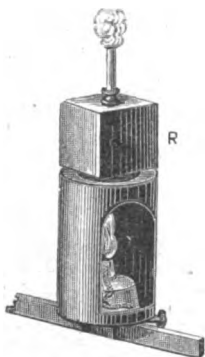



Fig. 79. - Il cubo di Leslie (cubo di ottone che ha una delle 4 facce laterali annerita ed una delle altre tre speculare) mentre si riscalda pieno di acqua.

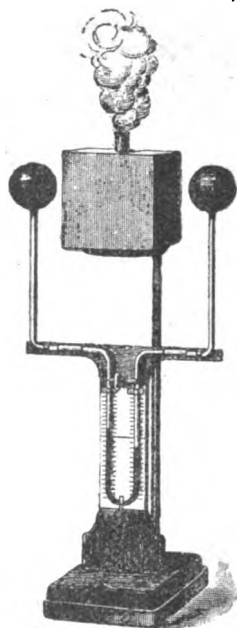



Fig. 80. - Un termoscopio differenziale (con un liquido nel tubo ad *u* inferiore e con due bulbi anneriti posti simmetricamente) mostra che il cubo di Leslie riscalda più dalla faccia annerita che dalla speculare.

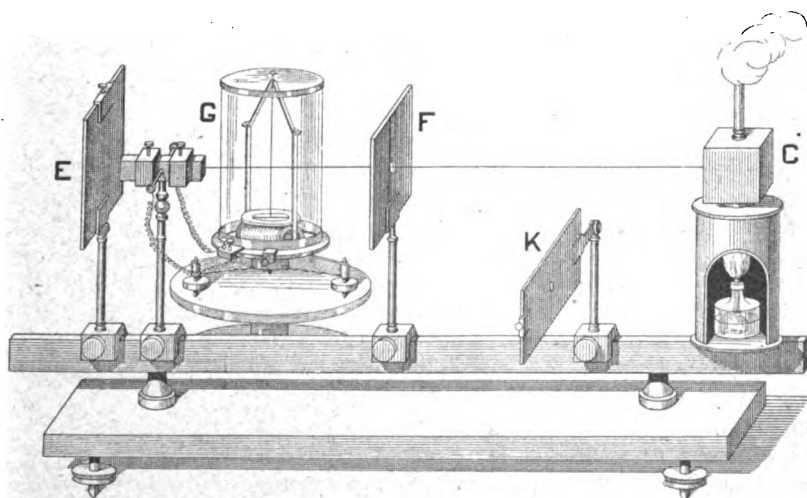



Fig 81. - Macedonio Melloni studiò le proprietà del calor raggiante col dispositivo classico qui rappresentato al quale si suol dare il nome di *banco del Melloni*. Il calor raggiante (proveniente ad esempio dal cubo di Leslie *C*) andava, attraverso a diaframmi forati ed a dispositivi convenienti a raggiungere la *pila termoelettrica*, apparecchio che descriveremo in elettrologia, che è rappresentato in figura nel parallelepipedo ad asse orizzontale situato a destra del diaframma *E* e che, colpita da raggi calorifici, originava un fenomeno elettrico osservabile mediante l'apparecchio (galvanometro) *G*.

Così si spiega l'uso delle serre, le cui pareti lasciano facilmente entrare (a riscaldare i corpi interni) il calore che accompagna i raggi solari, ma non lasciano poi uscire il calore diffuso dai corpi riscaldati.

Così le nubi lasciano passare il calore dei raggi solari e arrestano il calore irradiato dal suolo. Ne risulta quindi che durante l'estate è spesso più caldo con cielo coperto che con cielo sereno.

Si chiama *potere diatermano* di un corpo, sotto uno spessore dato, il rapporto della quantità di calore che riceve alla quantità di calore che lascia passare. Per quello che abbiamo detto esso dipende dalla qualità delle radiazioni che lo attraversano.

Fig. 82. - Il calore irraggiato della sfera riscaldata *B* si riflette in *R* come si rilette una palla elastica che urti obliquamente un ostacolo. Si vedrà che ugualmente si riflette la luce.

Mai un corpo lascia passare tutto il calore raggiante che riceve, per cui è lecito chiedersi dove va quella parte del calore che non passa.

L'esperienza prova che a seconda dei corpi è rinviata indietro od assorbita. Il più delle volte è parzialmente rinviata e parzialmente ássorbita.

Il fenomeno del rinvio è detto di *riflessione* se il corpo ha superficie ben levigata, cosicchè il calore venga respinto in modo che ad ogni raggio *incidente* ne corrisponda uno *riflesso,* situato coll'incidente in un piano perpendicolare alla superficie riflettente e ad un fascio di raggi paralleli che investa la superficie ne corrisponda un altro (riflesso), costituito da raggi fra loro paralleli, inclinati esattamente come gli incidenti sulla normale alla superficie riflettente. È detto di *diffusione* il fenomeno di rinvio se il corpo ha superficie scabra e la riflessione apparisca irregolare per la innumerevole quantità di piccole superfici piane, variamente inclinate, costituenti la superficie del corpo ed investite dal calore. Fenomeni perfettamente analoghi, obbedienti alle medesime leggi, avvengono con la luce, oltre che col calore raggiante.

Fig. 83. - La sfera calda riscalda più la lamina annerita dell'altra che è lucida, perchè questa ha minor potere assorbente della prima.

Si chiama *potere riflettente* di un corpo il rapporto fra la quantità di calore riflesso e la quantità di calore incidente. *Potere diffusivo* è il rapporto fra la quantità di calore diffuso in una direzione data e la quantità di calore incidente.

Tutto il calore raggiante ricevuto da un corpo e che non sia nè riflesso, nè diffuso, nè trasmesso dal corpo, viene da questo assorbito.

Ogni fascio incidente q si divide dunque nelle sostanze atermane in

un fascio riflesso r, in un altro diffuso d ed in un terzo assorbito a. Se queste lettere rappresentano le quantità di calore che formano rispettivamente ciascuno dei fasci, si ha:

$$q = r + d + a. \qquad (24)$$

Il *potere assorbente* di un corpo è il rapporto della quantità di calore che assorbe alla quantità di calore che riceve.

Spesso si considera il *potere assorbente, relativamente al nero fumo*; rapporto fra il potere assorbente d'un corpo e quello del nero fumo.

In virtù della circostanza che i poteri assorbente, riflettente e diffusivo di un medesimo corpo, per un fascio incidente q, sono rappresentati rispettivamente da

$$A = \frac{a}{q}, \quad R = \frac{r}{q}, \quad D = \frac{d}{q};$$

la relazione (24) dà l'altra:

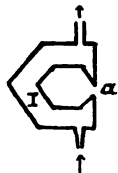
$$R + D + A = 1. \qquad (24^{\text{bis}})$$

Confrontando il potere assorbente ed il potere emissivo di uno stesso corpo, relativamente al nero fumo (per una medesima specie di calore), si constata che sono uguali. Così sono entrambi uguali ad 1 per il nero fumo.

Non è male ricordare che i fondamenti della scienza del calor raggiante furono gettati con mirabile intuito e con abilità sperimentale di primo ordine da un italiano: Macedonio Melloni. Egli fissava per tal modo quel legame di fratellanza, dopo di lui reso ancora più manifesto, fra il calore e la luce.

Fig. 84. - Radiometro di Crookes. È un palloncino contenente aria rarefatta nel quale può muoversi con debolissimo attrito un molinello ad asse verticale le cui alette sono di mica, e, nel medesimo ordine, hanno ciascuna una faccia annerita con nero fumo e l'altra in condizioni normali. Facendo cadere sul palloncino dei raggi calorifici il molinello si pone in movimento rotatorio, cosicchè può servire ad attestare la presenza di siffatti raggi. Il movimento si attribuisce a ciò che le facce annerite si riscaldano più delle altre e le particelle d'aria, che nel moto incessante loro vanno a colpirle, ritornano indietro con maggior forza viva determinando per reazione il moto in senso inverso delle alette.

§ 98. **Il corpo teoricamente nero.** — Si chiama *corpo nero* o *ricevitore totale* un corpo che assorba completamente tutte le radiazioni che riceve. Fra i corpi reali nessuno merita tale denominazione; quello che più vi si avvicina è il nero fumo.

Se nessuna sostanza si comporta rigorosamente come vuole la definizione di corpo nero, è bensì possibile realizzare un sistema che si comporti, non per il materiale che lo costituisce, ma per la disposizione sua, come vuole la definizione di córpo nero.

A realizzare un corpo nero si ricorre attualmente ad un corpo cavo, munito di una piccola apertura: le radiazioni che penetrano pel foro subiscono delle riflessioni multiple nell'interno delle cavità e finiscono per essere completamente assorbite. La piccola apertura si comporta quindi come un corpo nero.

I a

Fig. 85.

La Fig. 85 rappresenta il dispositivo di Kurlbaum, che consente di conferire ad esso una temperatura diversa da quella dell'ambiente con circolazione di liquido o di vapore nell'intercapedine I.

§ 99. **Legge di Stefan-Boltzmann.** — Per il corpo nero, il coefficiente α della relazione (23) del § 97 ha il valore 4, donde la legge Stefan-Boltzmann: *la emissione totale di un corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta.* Tale legge si rappresenterà con la formola

$$E = AT^4 \qquad (25)$$

ove A è il valore che assume k per il corpo nero. Fra i corpi reali il nero fumo ed il carbonio soddisfano sensibilmente a questa legge.

§ 100. **La legge di Draper.** — Un corpo, quando venga riscaldato, raggiunta una certa temperatura, comincia ad apparire luminoso: rosso cupo e poi grado grado, col persistere nel riscaldamento, diventa di un rosso vivo e finalmente di un color bianco più o meno splendente.

Draper aveva in proposito enunciata una legge che porta il suo nome e secondo la quale *tutti i corpi cominciano a diventare luminosi per riscaldamento, a 525°*. In realtà questa è la temperatura alla quale diventa luminoso un corpo nero. Gli altri corpi lo diventano ad una temperatura superiore, ma di pochissimo.

Orbene, la intensità di radiazione di un corpo, che irradi per riscaldamento, dipende, ad una temperatura determinata, dal suo potere assorbente e sarà tanto più grande quanto più questo sia grande. Ne segue che metalli lucidi, i quali conservino il loro elevato potere riflettente ad alta temperatura, devono brillare (come difatti accade) molto meno del nero fumo.

Così una sfera cava di metallo lucido, con una piccola finestra che si comporti quale corpo nero, ad alta temperatura farà apparire in chiaro, su fondo meno chiaro, il foro.

§ 101. **La costante solare - La temperatura nera del Sole.** — Langley da misure accurate è giunto alla conclusione che se l'atmosfera non assorbisse parte della radiazione solare, il Sole irradierebbe verso la Terra per minuto e per cmq., sotto una incidenza normale, 2,75, o, in cifra tonda, 3 calorie (si sottintende *grammo*).

A questo numero si suol dare il nome di *costante solare.*

Orbene, se il Sole fosse un corpo perfettamente nero e desse origine a sola radiazione termica, in base alla legge Stefan-Boltzmann si potrebbe calcolare col valore della costante A e col valore della costante solare, la temperatura del Sole. Ed è stata calcolata questa temperatura, che, per l'ipotesi dell'essere il Sole corpo nero, messa a base del calcolo, si è detta *temperatura nera.*

Essa è risultata di 6500° assoluti, ossia di circa 6200° centigradi.

La temperatura *reale* può essere più elevata se il potere assorbente del Sole è minore dell'unità o più debole se interviene qualche fatto di luminescenza non termica, o chimica od altro.

§ 102. **Pirometro del Fery.** — La legge Stefan-Boltzmann è stata utilmente e vantaggiosamente applicata dal Fery nella realizzazione del suo pirometro che serve alla misura delle alte temperature dei forni, i quali si comportano come corpi neri. La radiazione termica va ad agire, opportunamente concentrata, su di un sistema termoelettrico del quale avremo occasione di parlare a suo tempo e che dà modo di desumere la temperatura desiderata.

§ 103. **La legge del Kirchhoff.** — Per due fasci calorifici della stessa natura (§ 97) le tabelle dei poteri assorbenti dei vari corpi e dei rispettivi poteri emissivi, riferiti al nero fumo, mostrano che le due quantità sono rappresentate per un medesimo corpo dallo stesso numero. Esiste anche una classica esperienza dovuta al Ritchie per dimostrare tale uguaglianza. Ma l'espressione di siffatta uguaglianza è implicita in una legge, dimostrata teoricamente dal Kirchhoff, e detta *legge del Kirchhoff*, secondo la quale il rapporto fra il potere emissivo (e) ed il potere assorbente (a) di un determinato corpo, ad una determinata temperatura e per un determinato fascio di raggi, è uguale al potere emissivo (E) per quella temperatura e per quel medesimo fascio di raggi, del corpo nero.

La legge può dunque esprimersi con la relazione

$$\frac{e}{a} = E, \qquad (26)$$

o anche

$$e = a \, . \, E. \qquad (27)$$

E siccome a è sempre inferiore all'unità, salvo che pel corpo nero, ne risulta che il potere emissivo e del corpo nero è il più grande di tutti. Inoltre risulta che a è diverso da o se e è disuguale da o ed E pure disuguale da o; il che vuol dire che un corpo assorbe le radiazioni che emetterebbe alla stessa temperatura. Non è male avvertire che la reciproca non è sempre vera perchè potrà in qualche caso succedere che non essendo nulli E ed a , e sia praticamente nulla.

Conduzione.

§ 104. **Conduzione del calore.** — La esperienza di ogni giorno ci insegna che il calore può propagarsi attraverso ad un corpo, come se passasse di strato in strato attraverso al corpo medesimo. Per cui la nozione di *conduzione* o *conducibilità termica* è fornita dalla esperienza quotidiana a tutti. Ma alcuni corpi si lasciano facilmente attraversare dal calore e altri difficilmente.

Un cucchiaio d'argento, immerso per una estremità in un liquido caldo, si riscalda presto all'altra estremità, tanto da scottare e da non potersi toccare se il liquido è bollente; mentre un cucchiaio di legno può tenersi impunemente per un estremo, mentre l'altro è immerso in un liquido ad alta temperatura.

Di tutti i corpi l'argento è il miglior conduttore del calore, poi vengono gli altri metalli. I minerali, il vetro, la porcellana conducono ancora un poco; le sostanze di origine vegetale, come il legno ed il cotone, e le sostanze organiche animali, come i peli e la lana, conducono malissimo.

Vengono poi, a grandissima distanza, i liquidi.

I gas non hanno conducibilità sensibile.

Le differenze di conducibilità fra i diversi corpi spiegano le sensazioni diverse di freddo e di caldo che dà il tocco di diversi corpi alla medesima temperatura.

Se si tocca con la mano un corpo buon conduttore, per esempio una sbarra di ferro alla temperatura di 10 gradi, siccome la mano ha una temperatura superiore, il calore della mano passa rapidamente sul

ferro e si diffonde in tutta la massa di questo. Si prova quindi una sensazione di freddo.

Se si tocca un corpo cattivo conduttore, per esempio una tavola di legno, alla stessa temperatura di 10 gradi, il calore della mano riscalda i punti di contatto, ma non viene richiamato in tutta la massa del legno: non si prova quindi sensibile impressione di freddo.

Questa è la ragione per cui gli utensili metallici che debbono essere portati ad alta temperatura hanno il manico rivestito di legno. Ragione analoga consiglia la stiratrice a sostenere il ferro da stirare mediante un avvolgimento di panno.

Si può eseguire la seguente esperienza semplice, a mostrare nel modo più evidente effetti dello stesso genere. Col contatto migliore si inviluppa, mediante mussolina, una sfera di rame e si colloca sulla mussolina un pezzo di carbone rovente; la stoffa non brucia, perchè il calore del carbone si diffonde in tutta la massa di rame e la temperatura si eleva lentamente. Si fa identico inviluppo intorno ad una sfera di legno; ponendo poi sulla mussolina del carbone rovente, la stoffa si accende perchè il calore trasmesso ai punti toccati non si propaga che difficilmente ai punti vicini.

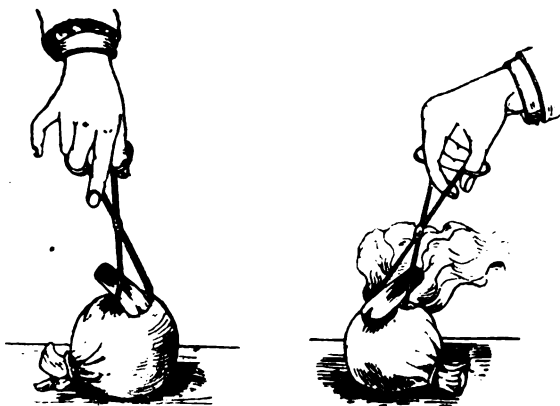



Fig. 86.

Fig. 87. - Asticciuole uguali ma costituite di materiale vario sono poste con un estremo in contatto con una faccia di una scatola metallica. Esse si rivestono uniformemente con cera e poi si versa acqua calda nella cassetta metallica. Il calore propagantesi dall'acqua alle asticciuole non fonde la cera superficiale delle asticciuole sino alla stessa distanza dalla cassetta in tutte, dimostrando con ciò che i vari corpi costituenti le asticciuole medesime non conducono ugualmente il calore.

Una esperienza dovuta ad Ingenhousz ed eseguibile coll'apparecchio della Fig. 87 mostra molto chiaramente la ineguale conducibilità dei diversi metalli.

Utile applicazione della conducibilità dei metalli è quella della lampada di sicurezza del Davy, consistente in una lampada la cui fiamma si forma in ambiente circondato da una rete metallica. Le reti metalliche, come mostra la Fig. 88, sottraggono, e diffondono agli estremi, per conducibilità, il calore, dalle sorgenti alle quali si pongano in contatto, tanto da impedire che il calore della fiamma accesa sotto ad una rete traversante un getto a gas, si comunichi alla parte superiore del getto, o viceversa.

Una lampada di sicurezza (Fig. 89), che sia trasportata accesa in

luogo ove si trovi un gas accensibile e detonante, è sede di detonazione entro alla rete, ma non accende con la propria fiamma il miscuglio esterno; serve quindi bene ad esplorare le miniere, nelle quali si abbia pericolo di produzione di *grisou.*

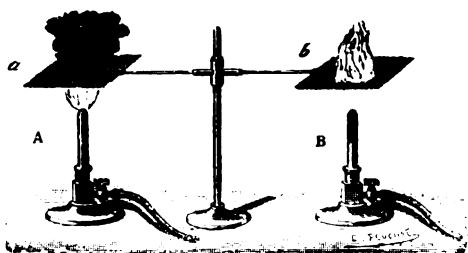



Fig. 88.

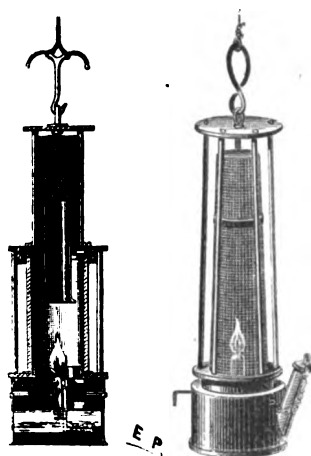



Fig. 89.

§ 105. **Regime variabile e regime permanente - Caso del muro e caso della sbarra.** — Il primo studio serio ed esauriente, relativo alla propagazione del calore per conduzione, fu dato da Fourier partendo dall'ipotesi che ogni molecola calda irraggi, verso la molecola meno calda più vicina, una quantità di calore dipendente dalla distanza; proporzionale alla differenza fra le temperature delle due molecole e indipendente dalla temperatura della prima molecola. Le conclusioni cui giunge la teoria matematica della conduzione (fatta dal Fourier partendo da questa ipotesi, che consiste in fondo nell'applicare la legge di Newton alle molecole) si possono sensibilmente ritenere in accordo coi fatti.

Un corpo di forma qualunque, in contatto per una porzione della sua superficie con un corpo caldo a temperatura costante, riceverà da questo corpo calore con continuità che si propagherà di strato in strato. Siccome nuove quantità di calore arrivano senza posa dalla superficie calda, il calore si trasmetterà fino a distanze di più in più grandi sul corpo e se nel tempo t la temperatura in un punto A è T, nel tempo $t + \tau$ la temperatura in quel medesimo punto sarà divenuta $T + \theta$ e per trovare il valore t bisognerà andare in un punto B, situato più lontano di A rispetto alla superficie calda. Si avrà dunque, dopo stabilito il contatto del corpo con la superficie calda, un periodo in cui la temperatura di ciascuno dei vari punti del corpo cambia da istante ad istante. Si dice che il corpo è soggetto al *regime delle temperature variabili* o più semplicemente al *regime variabile.*

Ma arriverà il momento in cui la perdita di calore di ogni punto verso le regioni più fredde sarà compensato esattamente dal flusso di calore che gli arriva dalle regioni più calde. In queste condizioni, la temperatura in ogni punto rimarrà invariabile e non dipenderà che dalla posizione del punto nell'interno del corpo. Si dice allora che il corpo ha raggiunto il *regime delle temperature stazionarie* o anche che è nel *regime permanente.*

La teoria del Fourier riguarda queste due condizioni ben differenti. E per ciascuna di queste condizioni il Fourier si è riferito a due casi

limiti distinti: quello così detto del *muro* e quello della *sbarra*. Si è riferito cioè:

1. Alla propagazione del calore attraverso ad un corpo le cui facce opposte parallele abbiano estensione infinitamente grande, cosicchè non vi sia luogo a considerare perdite di calore nel tragitto dalla superficie laterale.

2. Alla propagazione del calore attraverso ad un corpo la cui sezione abbia piccola estensione rispetto alla lunghezza, corpo quindi pel quale la perdita dalle pareti laterali è forte.

Si tratta evidentemente di casi estremi fra cui si troverà la generalità dei casi reali ordinari.

§ 106. **Legge del Fourier.** — Per il caso del muro in regime permanente, la teoria del Fourier porta a stabilire:

1. Le temperature dei vari punti lungo una retta normale alle due

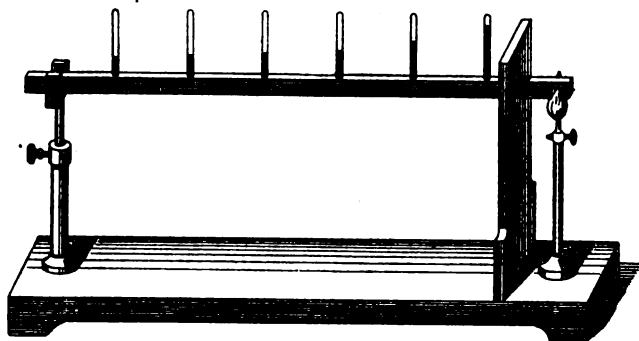



Fig. 90. - In virtù della legge di Biot e Lambert, collocando ad intervalli uguali lungo una sbarra orizzontale di metallo e riscaldando ad un estremo (colla avvertenza di proteggere i termometri dall'irraggiamento diretto della sorgente) i livelli del mercurio si dispongono secondo una curva parabolica.

facce, mantenute a temperature fisse T e t, sono proporzionali alle distanze dei punti dalla faccia meno calda.

2. La quantità di calore Q che attraversa nell'unità di tempo l'area S di un piano intermediario qualunque, parallelo alle facce, è data dalla relazione

$$Q = K \frac{T - t}{d} S; \qquad (28)$$

ove d è la grossezza del muro e K è un coefficiente caratteristico del materiale costituente il muro.

Tale coefficiente K diventa uguale a Q se si fa $T - t = 1$, $S = 1$ e $d = 1$. Riceve il nome di *coefficiente di conducibilità termica* del corpo e rappresenta evidentemente la quantità di calore che attraversa in un secondo l'unità di superficie (cm. quadrato) d'un muro, avente lo spessore d'un cm., formato con quel corpo, e le cui facce estreme siano a temperature differenti fra loro di 1°.

A. Berget è stato il primo che ha effettuato misure precise del coefficiente K. Ecco alcuni risultati:

Mercurio	0,02	Piombo	0,08	Stagno	0,15
Ferro	0,15	Zinco	0,30	Rame	1,04

§ 107. **Legge di Biot e Lambert.** — Per il caso della sbarra non possiamo esprimere con linguaggio semplice i risultati della teoria del Fourier. Ci riferiremo alla condizione speciale della sbarra, considerata dalla legge seguente di Biot e Lambert: *In una sbarra abbastanza lunga, perchè si possa trascurare il diametro della sezione rispetto alla lunghezza, gli eccessi di temperatura delle varie sezioni di essa sulla temperatura dell'aria*

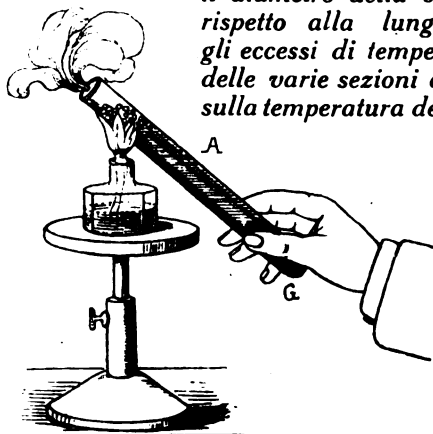



Fig. 91. - L'acqua *A* che sovrasta il ghiaccio *G* può bollire in alto senza che il ghiaccio fonda.

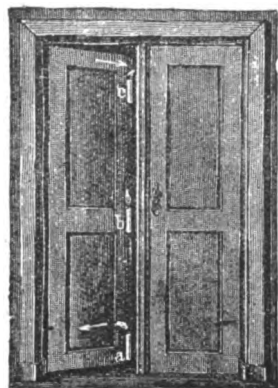



Fig. 93. - Anche in un ambiente quieto si hanno movimenti convettivi che ben si pongono in evidenza colla esperienza della figura. L'aria all'esterno più fredda entra in esso per la parte inferiore di una porta aperta e per le inevitabili fessure inferiori se la porta è chiusa; a sostituire l'aria riscaldata da corpi caldi o da persone situate nell'ambiente, la quale esce per la parte superiore della porta.

ambiente decrescono in progressione geometrica, mentre le distanze delle sezioni dall'estremo caldo crescono in proporzione aritmetica.

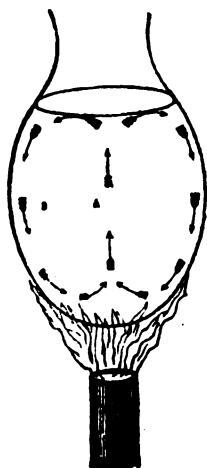



Fig. 92. - La convezione del calore nei liquidi quale vien messa in evidenza dal moto di minuta segatura di legno collocata prima del riscaldamento nel fondo del recipiente contenente il liquido.

CONVEZIONE.

§ 108. **Convezione del calore.** — Abbiamo detto che i liquidi sono cattivi conduttori del calore. Se si accende dell'etere e del petrolio alla superficie di una massa d'acqua, in questa, a qualche centimetro di profondità, non si apprezza sensibile riscaldamento. Del pari si può far bollire alla superficie, come mostra la Fig. 91, dell'acqua posta in un tubo di vetro, senza che si provi una elevazione di temperatura sensibile nella parte inferiore. Il mercurio è il solo liquido che faccia eccezione alla regola generale: esso si manifesta buon conduttore del calore.

Eppure, per ritornare al caso dell'acqua, prototipo dei liquidi cattivi conduttori, ponendo sopra ad un focolare un recipiente contenente dell'acqua, questa si riscalda rapidamente in tutta la sua massa e la ragione si è che i liquidi trasmettono il calore con meccanismo diverso da quello detto di conduzione, che è solo possibile in misura apprezzabile nei corpi solidi.

Tal meccanismo si opera nei *fluidi* quando siano riscaldati dal basso,

e consiste in ciò: che le parti inferiori della massa fluida, risentendo più direttamente e prima delle altre l'azione del riscaldamento, si dilatano, divengono più leggere e salgono verso l'alto, trasportando calore. Scendono per tal modo verso il basso le parti più dense e più fredde, destinate poi, a lor volta, alle identiche vicende delle prime.

Si possono operare tali movimenti, che si dicono *convettivi* (e il modo di propagazione del calore chiamasi *convezione*) riscaldando un vaso di vetro pieno di acqua (Fig. 92) nella massa inferiore della quale sia collocata segatura di legno (preferibilmente di quercia). Si vede formarsi una corrente ascendente nel mezzo, mentre si formano correnti discendenti lungo le pareti.

Simile meccanismo di propagazione del calore, nel caso dei gas, che, come dicemmo, sono dotati di insignificante conducibilità, spiega il perchè uno strato gassoso, mantenuto immobile, possa quasi considerarsi come incapace di trasmettere calore. Allorchè si circonda con un rivestimento d'ovatta una caffettiera riempita di acqua bollente, la superficie esteriore dell'inviluppo prova una elevazione di temperatura appena sensibile. Ciò dipende dal fatto che l'ovatta è formata con filamenti incrociati in mille modi, che si oppongono al movimento dell'aria imprigionata nei loro intervalli e quindi alla propagazione del calore per moti convettivi. D'altra parte l'aria, come tutti i gas, è un corpo cattivo conduttore del calore.

Per le stesse ragioni (considerate a proposito dell'ovatta) offrono una debole propagazione del calore le pellicce, le piume, la paglia, il feltro, la segatura di legno ecc.

APPLICAZIONI.

§ 109. **Conservazione del calore in un corpo - Protezione contro il freddo e contro il caldo.** — Connesso a tutto quello che fin qui si è detto, a proposito dei diversi modi di propagazione del calore, sta il problema di mantenere invariata la temperatura di un corpo. A questo fine bisogna evidentemente:

1. Tener lontani corpi caldi capaci di emettere molto calore e corpi freddi capaci di assorbirne, o tutt'al più rivestirli di materiale a debole potere emissivo.
2. Evitare l'evaporazione, ed in particolare curare che la superficie del corpo non sia umida.
3. Avvilupparlo con materiale cattivo conduttore.
4. Disporre la superficie per modo che abbia debole potere emissivo e quindi anche debole potere assorbente.

Il tipo di recipiente adatto ad impedire scambi di calore dall'interno all'esterno è quello rappresentato dalla Fig. 94 e munito di due pareti fra le quali è praticato il vuoto. È dovuto a Dewar.

È un pallone od un bicchier di vetro, argentato alla superficie perchè abbia debole potere emissivo, ed è saldato in un altro pallone o bicchiere più grande pure argentato, ma internamente. Fra i due palloni è fatto il vuoto. Così sono soppresse la conducibilità, la convezione e gli scambi per irraggiamento.

Si usano tali recipienti per conservare l'aria liquida; ma attualmente si adoperano anche per usi domestici in quanto permettono di conser-

vare freddi per parecchio tempo i liquidi che vi si mettono. È evidente che questi stessi recipienti, le cui pareti son quasi impermeabili al calore, permettono ugualmente di conservare caldi i liquidi come il caffè, il thè, il latte, il brodo ecc. Il loro prezzo elevato però, ed anche la loro fragilità (quando si rompono danno origine ad un colpo secco violento per l'implosione dell'aria nell'intercapedine) ne impediscono, per ora almeno, un uso corrente.

Fig. 94.

In applicazione delle nozioni su esposte, per proteggersi nell'inverno contro il freddo, conviene abitare in appartamenti con muri di pietra molto grossi, perchè la pietra ha grande conducibilità, superiore assai a quella dei mattoni, così che i muri in mattoni possono essere meno grossi. In Russia le pareti delle capanne sono generalmente fatte con doppia impalcatura di legno e dentro di essa si colloca della paglia, della segatura di legno e dell'erba secca; l'aria imprigionata fra le due impalcature forma uno strato a debole conducibilità.

Poichè, soprattutto mercè il contatto dell'aria con la superficie dei vetri delle finestre, si opera la dispersione del calore, nei paesi freddi si riduce la dispersione, impiegando doppie vetrate, fra le quali resta imprigionato uno strato d'aria.

Gli animali dei paesi freddi hanno il corpo coperto da peli, che divengono più spessi all'avvicinarsi dell'inverno.

Noi pure ci copriremo per preservarci dal freddo con pellicce animali, con stoffe di lana o con vesti ovattate. Del pari non useremo vestiti ampi, nè ci stringeremo troppo i panni addosso. Tutto questo per le ragioni ben note e di cui abbiam parlato a proposito della propagazione del calore attraverso i gas.

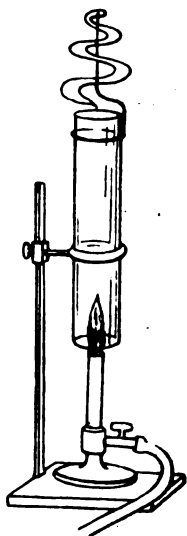
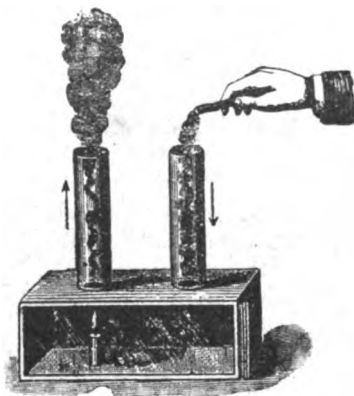
La protezione contro il caldo si otterrà negli appartamenti cogli stessi mezzi che nell'inverno proteggono dal freddo: muri grossi, doppie porte e doppie finestre. Quanto agli abiti, ci vestiremo nell'estate, per non soffrire troppo il caldo, con indumenti leggeri ed ampi che facilitino le correnti di convezione atte a mantenere fresca, con la evaporazione del sudore, la superficie del nostro corpo. Il colore delle vesti sarà bianco o almeno chiaro, perchè esse abbiano il minimo potere assorbente.

Si mantiene bene il freddo nelle ghiacciaie, che servono a conservare durante l'estate il ghiaccio accumulato nell'inverno. Sono vaste cavità praticate nel suolo ed a pareti in muratura rivestite da cemento. Le chiudono volte rivestite di terra e di stoppia.

§ 110. **Riscaldamento e ventilazione.** — Ma lo studio che abbiamo rapidamente fatto sui diversi modi di propagazione del calore, particolarmente ciò che si è detto a proposito della convezione nei

liquidi e nei gas, tocca direttamente un problema del più alto interesse per l'igiene delle abitazioni: quello del riscaldamento. Ad esso poi è intimamente collegato, come bene apparirà, quello della ventilazione.

Crediamo utile dire qualche cosa in proposito, per quanto elementarmente e rapidamente.

È superfluo dire che cosa significhi riscaldare. Ventilare significa rinnovare l'aria. E l'esperienza ha dimostrato che occorre

almeno far passare in una sala da 6 ad 8 metri cubi per persona e per ora, se si vuole che essa si mantenga in buone condizioni igieniche.

Il riscaldamento degli appartamenti si ottiene in maniere diverse, secondo la grandezza delle camere e secondo il loro numero; sempre però si produce il calore con la combustione di corpi, detti combustibili.

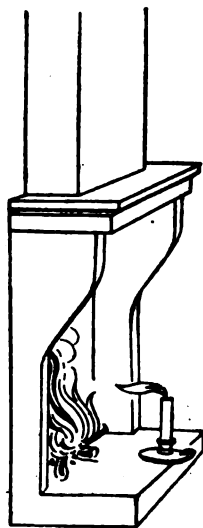
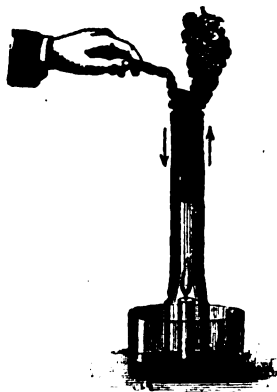



Fig. 95. - Esperienze dimostrative del tiraggio di un camino.

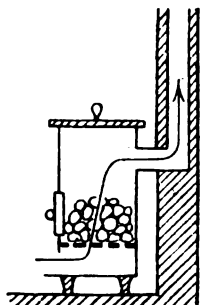



Fig. 96. - Sezione di una stufa comune.

La scelta del combustibile non è indifferente, perchè non tutti i corpi danno la stessa quantità di calore bruciando. Così un grammo di antracite sviluppa più calore di un grammo di coke; questo più calore di un grammo di gas illuminante, e questo più di un grammo di legna.

Ordinariamente, se altre ragioni non consigliano diversamente, si scelgono quei combustibili che, per una medesima quantità di calore fornita, costano meno.

Tutti gli apparecchi di riscaldamento hanno il focolare, ove si brucia il combustibile, e si dividono

in due gruppi. Al primo appartengono quelli nei quali il calore del focolare è utilizzato direttamente per riscaldare l'ambiente (caminetti, stufe). Al secondo appartengono quelli nei quali il focolare riscalda dell'aria, dell'acqua o produce del vapore acqueo, che trasportano poi il calore negli ambienti da riscaldare (caloriferi).

Pei piccoli ambienti isolati si usano caminetti alimentati con legna, coke o carbon fossile. I caminetti sono focolari comunicanti coll'esterno mediante un tubo verticale, che trasporta i prodotti della combustione e determina il tiraggio, vale a dire il passaggio continuo di aria nel combustibile.

Con un caminetto si usa solo una piccolissima porzione del calore prodotto (dagli $^{8}/_{100}$ ai $^{17}/_{100}$ del calore totale), quello di irradiazione. Costituiscono quindi un sistema di riscaldamento molto costoso. Ma i caminetti presentano il vantaggio di determinare una ventilazione attiva della camera, poichè in conseguenza del tiraggio (Fig. 95), una grande quantità di aria è continuamente attratta dall'ambiente nel focolare e conseguentemente dal di fuori nell'ambiente, spesso attraverso alle connessioni imperfette delle porte e delle finestre.

È facile capire come funziona un caminetto.

Sia un focolare aperto in avanti, limitato dietro con un muro della camera e sormontato da un tubo in mattoni, terminante al di sopra del tetto della casa.

Appena si accende il fuoco, l'aria del camino si riscalda e si eleva coi prodotti della combustione. La colonna gassosa che riempie allora il tubo è meno densa dell'aria della camera; la pressione P che esercita dall'alto in basso su di uno strato a (supposto per un istante in equilibrio) è dunque inferiore alla pressione P' che esercita allo stesso livello l'aria fredda della camera.

Conseguentemente lo strato inferiore che si eleva nel camino, è sostituito da un nuovo strato che si eleva a sua volta, e una corrente d'aria ascendente si stabilisce.

Ma la pressione esercitata dall'aria della camera diminuirebbe, e presto il tiraggio non avrebbe più luogo se l'aria richiamata dal camino non fosse sostituita da aria fresca proveniente dal di fuori, attraverso le fessure delle porte e delle finestre.

Il tiraggio essendo dovuto alla differenza dei pesi della colonna di gas caldi che riempie il camino e della colonna di uguale altezza di aria esterna, è tanto più grande quanto più caldi sono i gas del camino e quanto più questo è alto e largo. All'atto pratico però l'altezza non può superare un certo limite variabile coll'intensità della combustione, perchè i gas debbono ancora essere caldi quando arrivano all'estremo superiore del camino; e la larghezza non può superare un certo limite, perchè, se la sezione è troppo grande, si stabilisce nello stesso camino una corrente discendente di aria fredda, parallela alla corrente ascendente d'aria calda, e il camino fuma. Perchè il tiraggio sia attivo e la combustione intensa, l'apertura del focolare deve essere piuttosto piccola. Nei buoni caminetti la si regola, come ben si sa, a seconda del bisogno.

Le *stufe* sono di forme e di costituzione varia: comprendono tutte un focolare, che si colloca nell'ambiente da riscaldare, e una condotta di tiraggio. Il focolare è dentro ad un sistema in ghisa, in lamiera

od in terra cotta. L'aria necessaria alla combustione penetra nel focolare per un'apertura inferiore, ed il tiraggio si fa come nei caminetti. Il riscaldamento viene operato dalle stufe per irraggiamento della loro superficie e dei tubi di tiraggio, cosicchè la proporzione di calore utilizzato è molto più considerevole che non in un caminetto, ma non è

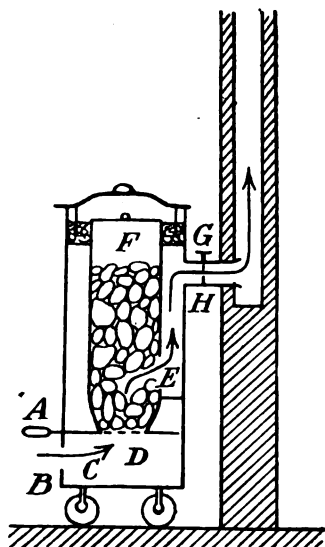



Fig. 97. - Sezione di una stufa a combustione lenta.

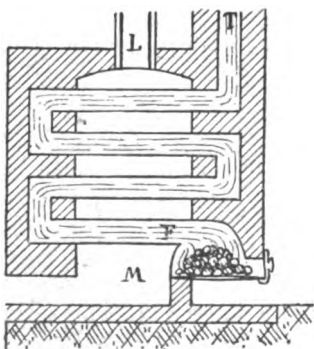



Fig. 98. - Calorifero ad aria calda. L'aria aspirata in *M* e procedente verso *L* per raggiungere i vari ambienti da riscaldare, vien riscaldata dai tubi guidanti al camino il fumo ed i prodotti gassosi della combustione che si effettua nel focolare.

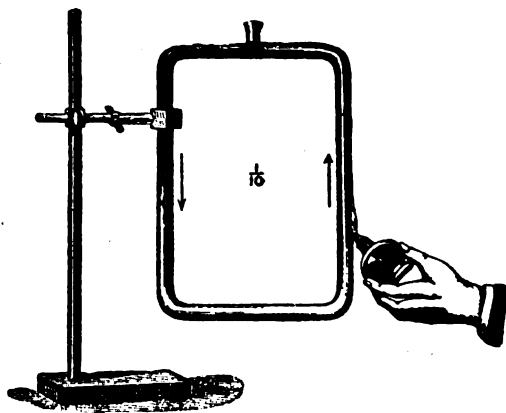



Fig. 99. - Schema di impianto di riscaldamento ad acqua calda.

Fig. 100. - Un radiatore per calorifero ad acqua calda.

riscaldamento molto salubre. La ventilazione, difatti, è debole, e se le pareti (spesso in ghisa) sono portate al rosso, il pulviscolo atmosferico di origine varia viene bruciato, ciò che dà del cattivo odore. Inoltre l'ossido di carbonio, velenosissimo, può attraversare la ghisa e viziare l'aria. Questi ultimi inconvenienti non si hanno nelle stufe di terra e sono attenuati in quelle nelle quali la ghisa è rivestita internamente da uno strato di terra refrattaria.

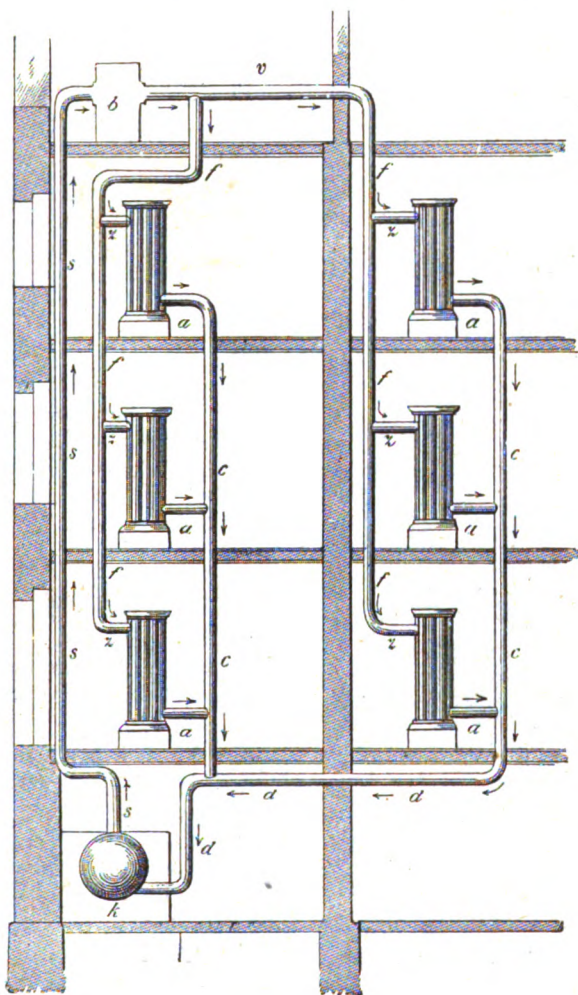
A proposito di stufe, dobbiamo notare come ne esistono in commercio di quelle dette a combustione lenta (Fig. 97). Esse meritano un giudizio sommario: sono pericolosissime, e da evitare sempre.

Per il riscaldamento dei grandi edifici costituiti da numerosi ambienti si usano i *caloriferi*.

Essi possono essere ad aria calda, ad acqua calda od a vapore d'acqua.

Fig. 101.

Caloriferi ad aria calda. — Un focolare posto nel sotterraneo dell'edificio riscalda (Fig. 98) un tubo contenente aria, la quale proviene dall'esterno. L'aria scaldata si eleva ed è condotta da tubi (aprentisi con bocche) nelle varie camere degli appartamenti. Sarebbe questo dei caloriferi ad aria calda un buon metodo per riscaldare e ventilare insieme un edificio, se coll'aria non entrasse negli ambienti della polvere e se questa polvere non venisse spesso, a contatto delle pareti calde dei tubi, decomposta e bruciacchiata, così da dare poi origine a cattivo odore.

Caloriferi ad acqua calda. - L'acqua di una caldaia *k* (Fig. 101) riscaldata dal focolare diviene specificamente più leggera, sale attraverso a tubi pieni pure di acqua, con essa comunicanti, che si diramano poi negli ambienti da riscaldare. L'acqua, raffreddandosi per cessione di calore, divenendo così più pesante, ridiscende nella caldaia per subire nuovamente e ripetutamente lo stesso moto circolatorio. I tubi che si svolgono negli ambienti da riscaldare attraversano serbatoi detti *radiatori*, costruiti in modo da avere una amplissima superficie, adatta ad una maggior cessione di calore (Fig. 100).

Caloriferi a vapor d'acqua. — Sono costituiti in modo simile a quello dei caloriferi ad aria calda. Trasportano calore per mezzo di vapore acqueo, che si produce nella caldaia e va a condensarsi in radiatori collocati nelle camere da riscaldare. Colla condensazione si cede molto calore. L'acqua condensata ritorna poi per tubi di discesa alla caldaia, per ripetere indefinitamente le stesse funzioni, finchè il focolare è acceso.

CAPITOLO X.

MACCHINE TERMICHE.

§ 111. **Macchine termiche.** — Si chiama *macchina termica* ogni apparecchio che permetta di realizzare la trasformazione del calore in energia meccanica utilizzabile.

In tutte queste macchine l'agente di trasformazione è un corpo liquido od aeriforme. Fornendogli opportunamente della energia termica gli si conferisce (trasformandolo) l'attitudine di produrre un lavoro esterno mediante la sua espansione.

Fig. 102. - Un tipo di caldaia. Recipiente cilindrico *A* che comunica con altri due recipienti cilindrici *B* detti *bollitori* ad esso paralleli e destinati ad aumentare la superficie complessiva di riscaldamento.

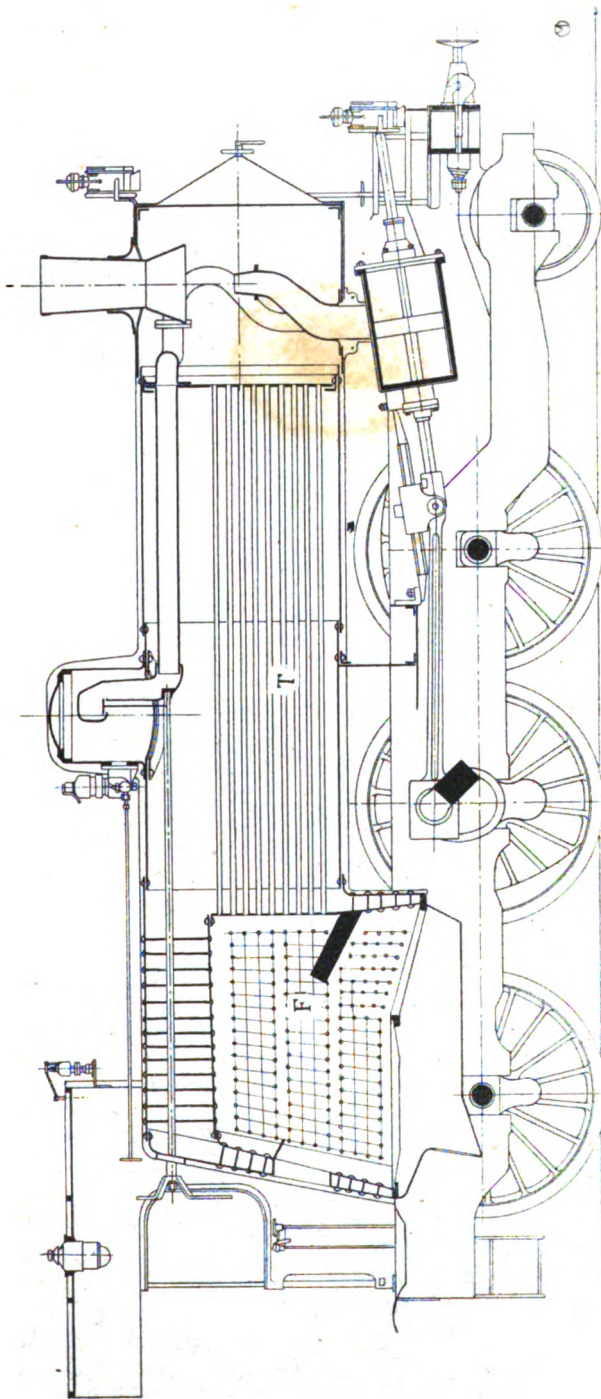
I principali tipi di macchine termiche sono:

1. La macchina a vapore a stantuffo, od alternativa.
2. Le turbine a vapore o turbo-motori.
3. I motori ad esplosione (a gas ed a petrolio).
4. I motori a combustione sotto pressione costante (motori ad olio pesante).

§ 112. **Macchine a vapore.** — La macchina a vapore è basata sul fatto che, scaldando acqua in ambiente ermeticamente chiuso e resistente (caldaia), si può far raggiungere al vapore che si forma, oltrechè una temperatura superiore a quella ordinaria di ebollizione dell'acqua, anche una pressione di gran lunga superiore a quella atmosferica. A 180° la pressione ha già il valore di 10 chilogrammi per cmq. Si utilizza questa pressione per dare ad uno stantuffo il moto di va e vieni, che si trasforma ordinariamente in moto rotatorio continuo e in qualche caso (occorrendo) in diversi altri movimenti per mezzo di opportuni organi meccanici.

Organi meccanici principali. — Ne segue che gli organi principali di una macchina a vapore saranno:

1. Una *caldaia* o generatore di vapore (separata dalla macchina propriamente detta), formato da un recipiente a pareti resistenti, nel quale si scalda dell'acqua ad una temperatura abbastanza elevata, perchè la pressione raggiunga parecchi chilogrammi per cmq. (Può avere varia forma: quelle, ad esempio, delle figure 102 e 103, o quella osser-

TAVOLA I.

Sezione di una locomotiva. — In *F* cassa focolare; in *T* tubi dai quali è attraversata l'acqua della caldaia, e fra i quali passano i gas caldi ed il fumo che poi escono, dopo aver riscaldata ampia superficie d'acqua, attraverso al camino.

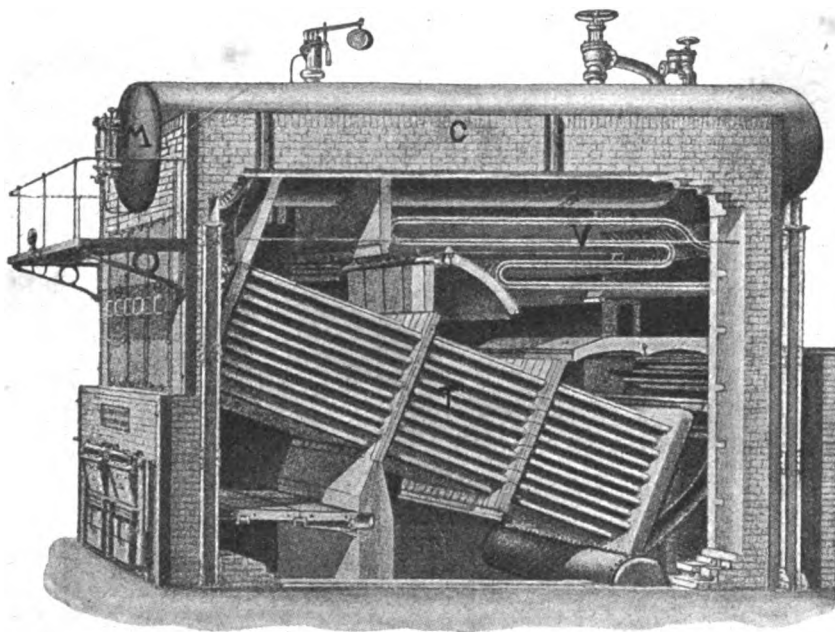



Fig. 103. - Caldaia a grande superficie di riscaldamento, perchè costituita da parecchie serie di tubi bollitori inclinati *T*, che sono scaldati direttamente dal focolare e che comunicano per la loro estremità più alta con un serbatoio cilindrico *C*. L'acqua riempie tutti i tubi ed il corpo superiore fino a metà. Il vapore saturo (perchè a contatto del liquido) che si forma nell'altra metà del corpo cilindrico (camera di vaporizzazione) è condotto all'apparecchio surriscaldatore *V*, il quale, mercè il calore proveniente dai gas caldi trasforma a pressione costante il vapore saturo in vapore *soprariscaldato* (vapore che alla pressione della caldaia ha una temperatura superiore a quella del vapore saturo) il quale esce dal surriscaldatore per operare nella macchina a vapore. La caldaia così costituita consente l'uso, tanto del vapore surriscaldato, quanto di quello semplicemente saturo, il che avviene solo per guasto al surriscaldatore. Per regolare il surriscaldamento, con una valvola opportuna si fa una miscela dei due vapori.

vabile nella tavola rappresentatrice della locomotiva). La caldaia è dotata di vari accessori, quali un *manometro* per misurare la pressione, una *valvola di sicurezza* a peso od a molla, che si apre allorchè la pressione all'interno sorpassa il limite pel quale la caldaia è stata costruita, un *livello* d'acqua, tubo di vetro grosso, che è in comunicazione con la caldaia e che (in base al principio dei vasi comunicanti) permette di constatare il livello dell'acqua. Sono annessi o separati gli *apparecchi di alimentazione* dell'acqua (pompe a vapore, iniettori, pompe a trasmissione ecc.).

2. Un *cilindro motore*, entro cui si sposta uno stantuffo. Si fa arrivare il vapore attraverso il cosidetto *cassetto di distribuzione*, alternativamente (come mostrano le figure 104 e 105) su ciascuna delle facce dello stantuffo. Questo stantuffo è così vivamente premuto e assume un movimento alternativo rettilineo.

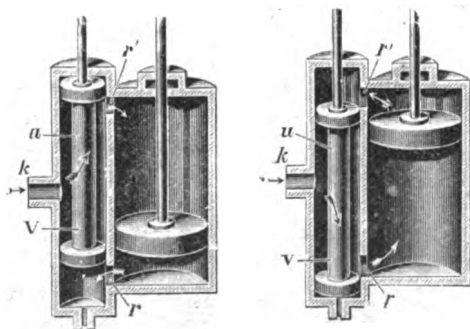



Fig. 104.

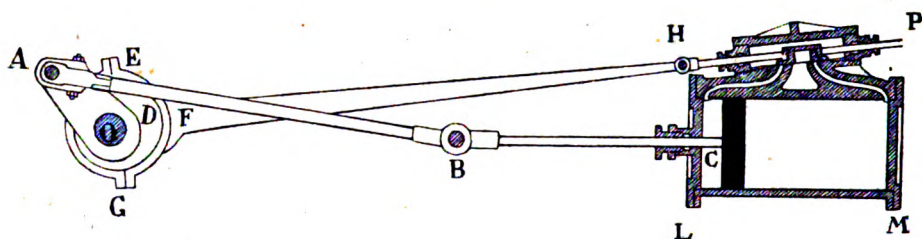



Fig. 105. - L'asta *BC* dello stantuffo è articolata in *B* con un'altra asta *AB* detta *biella* essa pure articolata con la manovella *AO* che è fissa ad un albero mobile intorno al proprio asse passante per *O*. La biella, messa in moto alternativamente in un senso e nell'altro dallo stantuffo, imprime un moto di rotazione continuo alla manovella e quindi all'albero. Il moto di questo si utilizza a muovere il cassetto di distribuzione, per la rotazione fuori di centro di un disco *D* solidale all'albero e scorrevole entro un anello *E* collegato mediante *FH* al cassetto medesimo. Il disco riceve il nome di *eccentrico* e, quanto al movimento, corrisponde ad una semplice manovella. In questa figura apparisce bene il cassetto di distribuzione. Le pareti del cassetto (piedi) che debbono chiudere i condotti di ingresso al cilindro hanno una conveniente superficie di ricoprimento per intercettare la comunicazione colla caldaia quando si è compiuta l'introduzione del vapore ed anche per variare il grado stesso di introduzione mercè l'azione del regolatore (Fig. 107).

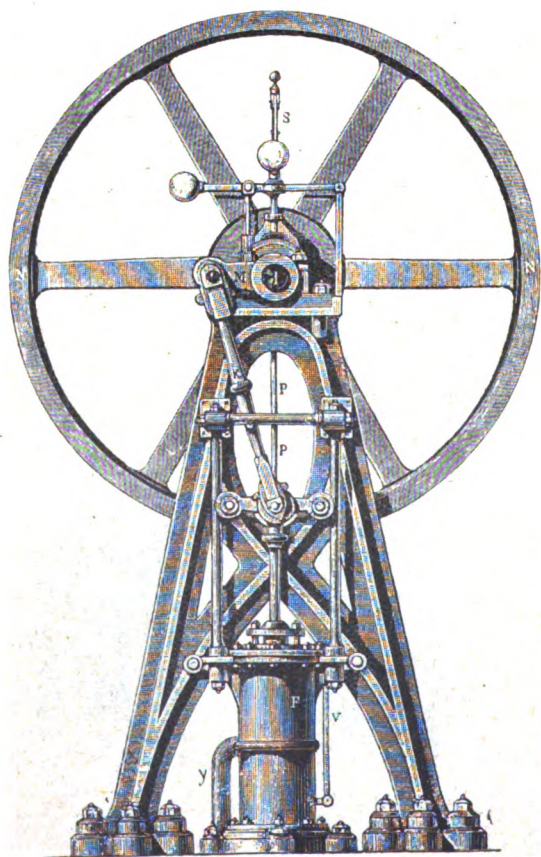



Fig. 106.

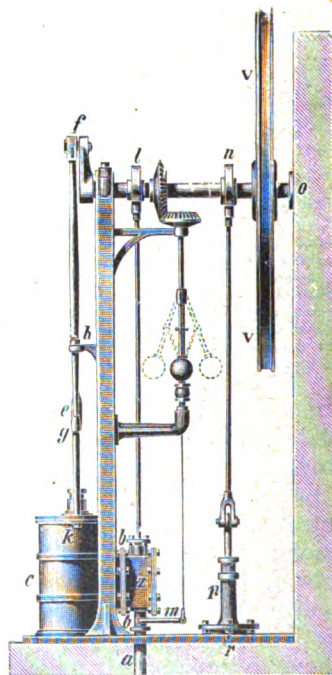



Fig. 107. - Per l'inerzia della massa circolare *V* (volano) fissa all'albero, che è capace di fornire la propria energia nei momenti in cui la macchina provi diminuzioni brusche di velocità e che ne può accumulare nei momenti di aumento, il moto della macchina vien bene regolato ad ogni giro. Sfere pesanti (regolatore a forza centrifuga) sostenute con articolazioni da aste convenienti, per reazione centrifuga scostano queste dalla posizione di verticalità elevandosi allorchè l'albero al quale sono collegate assuma molto rapida rotazione a causa di una variazione del lavoro resistente. Ciò porta, mediante leve opportune, ad una limitazione del peso di vapore agente nel cilindro della macchina e ad una regolazione quindi del moto di questa.

3. Un *meccanismo di spinta*, che trasforma il moto rettilineo alternativo dello stantuffo in movimento circolare e continuo (Fig. 105 e 106).

Si debbono anche considerare gli *organi regolatori del movimento* che sono il regolatore ed il volante (Fig. 106 e 107) e l'apparecchio *condensatore* che è una camera di dimensioni opportune ove il vapore di scarico del cilindro, a contatto con un *refrigerante* (acqua in generale) si condensa determinando nell'ambiente una pressione minore di quella atmosferica. Quest'ultimo ha, per la teoria della macchina a vapore, altissimo valore.

Regolatori del movimento. — Si usano, per regolare il movimento, il volano ed il regolatore a forza centrifuga, rappresentati nella Fig. 107.

Condensatore. — Il vapore, dopo aver lavorato nel cilindro viene, nel ritorno dello stantuffo, scaricato, o direttamente nell'atmosfera (macchine a scarico libero) oppure nella camera del condensatore (macchine a condensazione) ove, per il contatto diretto (vedi Fig. 108) od indiretto con una notevole massa d'acqua si condensa ad una temperatura, che, per la legge del Regnault stabilisce la pressione interna del condensatore, la quale è sempre assai minore di una atmosfera. Il prodotto della condensa, costituito dall'acqua introdotta, dal vapore condensato e dall'aria contenuta nell'acqua viene estratto mediante una pompa.

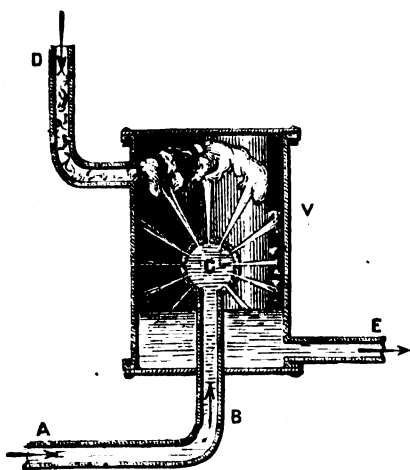



Fig. 108. - Condensatore. *V* recipiente; *ABC* tubo che conduce acqua fredda uscente a getti; *D* tubo che conduce il vapore nel condensatore; *E* tubo dal quale esce l'acqua dopo che essa ha servito a condensare il vapore.

Fasi di lavoro nel cilindro motore. — *Introduzione.* Il vapore si introduce nel cilindro non per tutta la corsa, ma per una frazione (grado di introduzione). In questa fase il lavoro comunicato allo stantuffo è fatto a pressione costante.

Espansione. Chiusa l'introduzione, il vapore si espande e fa sullo stantuffo un lavoro (detto di espansione) perchè la pressione diminuisce ed il volume specifico aumenta.

Scarico. Terminata l'espansione (fine corsa) il cassetto apre lo scarico e il vapore va nell'atmosfera o nel condensatore.

Compressione. Lo scarico termina prima della fine della corsa di ritorno; il vapore che resta nel cilindro è, nella rimanente parte della corsa, compresso, per ragioni economiche e meccaniche.

Macchine ad espansione multipla. — Nella macchina ad un cilindro il vapore compie in esso tutto il salto di temperatura fra quella della sorgente e quella del condensatore. Si hanno macchine a due o tre cilindri che per ragioni di economia frazionano tale salto e

quindi anche l'espansione. Se le manovelle di una macchina a due cilindri sono concordanti la macchina si dice *Woolf*, se sono ad angolo retto si dice *compound*. Per macchine a triplice espansione sono combinate la *woolf* con la *compound*. Nelle macchine a più cilindri il salto di pressione deve essere più elevato, anche oltre i 13 kg. per cmq. Quelle ad un cilindro hanno pressione di introduzione non superiore a 13 kg. per cmq.

Potenza delle macchine in uso. — Si costruiscono ora correntemente per l'industria delle macchine da 20 a 1000 HP. (cavalli vapore) di potenza, mentre per i grandi piroscafi si costruiscono gruppi per potenza di oltre 20000 HP.

Macchine fisse e mobili. — La macchina a vapore è *fissa* se connessa rigidamente al suolo, è *mobile* (locomotiva) se è portata sul carrello stesso che essa mette in moto.

Con la locomotiva si possono rimorchiare a velocità variabili grossi carichi nel caso di pendenze non troppo forti se l'aderenza colla strada è sufficiente. Per superare più forti pendenze si può aumentare l'aderenza foggiando opportunamente le rotaie. Ciò avviene nelle ferrovie dette a *cremagliera*. Esse possiedono oltre alle rotaie ordinarie una terza rotaia intermedia dentata in modo da formare cremagliera. Una ruota mossa dalla macchina (perchè a questa collegata) con i suoi denti corrispondenti a quelli della dentiera, girando, dà alla locomotiva moto lungo la dentiera. Per la discesa non occorre la energia del vapore. Basta la componente del peso del treno. Se l'accelerazione oltrepassa certi limiti occorre l'uso di freni convenienti.

§ 113. **Turbine a vapore o turbo-motori.** — Il vapore proveniente dalla caldaia ha una certa pressione e quindi una certa energia potenziale. Se si fa in modo di trasformare tutta questa energia in energia cinetica e tutta in apparecchio (ugello d'espansione) fisso in vicinanza di palette mobili che costituiscono la girante o turbina, allora questa vien mossa dalla forza viva del getto, ossia è una turbina ad azione (tipo Laval). Se invece nell'ugello (tubo a forma convergente in certi casi, in altri convergente e divergente) si trasforma la energia potenziale parzialmente in energia cinetica, mentre l'altra parte viene trasformata in cinetica nella girante. Allora questa gira per effetto dell'azione del getto effluente e per la reazione provocata dal getto stesso che esce dalla girante con velocità maggiore di quella con cui è entrato (perchè quando il vapore si espande la sua velocità aumenta). La turbina si dice allora a reazione (tipo Parson). Nelle turbine le palette della girante sono sempre incurvate, la loro forma varia a seconda dei tipi precedenti, perchè nel secondo caso deve esser tale da consentire l'espansione. I turbo-motori presentano sulle macchine alternative vantaggi, specie nelle grandi potenze (sopra i 1000 HP.), poi per comandare diretta-

Fig. 109. - Il vapore uscente dal tubo reagisce sul medesimo con una forza, la quale, esercitandosi normalmente alla bocca d'uscita, determina un moto rotatorio del tubo, se questo è piegato convenientemente. Si tratta della classica *eolipila*.

mente, senza organi intermediari, macchine elettriche. Il loro funzionamento è più regolare e più dolce, perchè non danno le trepidazioni causate nelle macchine a stantuffo dai moti alternativi delle diverse parti.

§ 114. **Motori ad esplosione.** — Mentre nelle macchine a vapore si fa compiere il ciclo di lavoro da un piccolo e determinato peso di vapore prelevato volta a volta dalla caldaia, ove (per la continua somministrazione di calore) viene prodotto; in queste macchine invece il fluido intermediario od operante (combustibile) viene direttamente introdotto nell'interno dell'organo principale (che è ancora un cilindro motore) previo mescolamento con una razione d'aria (comburente) superiore a quella teorica o strettamente necessaria per la combustione, ed ivi direttamente bruciato. Si può quindi considerare la sorgente di calore come interna al cilindro stesso, condizione questa favorevole alla migliore utilizzazione del calore. Il lavoro è dovuto al fatto che la miscela nell'esplodere a volume costante (combustione repentina) aumenta la sua energia interna la quale a sua volta nella successiva espansione dei prodotti della combustione genera lavoro esterno sullo stantuffo.

La macchina ad esplosione si compone di un cilindro con mobile nel suo interno uno stantuffo motore. La camera destinata a contenere la miscela di gas ed aria (*motori a gas*) oppure di benzina carburata ed aria (*motore a benzina*) oppure a petrolio in intima unione con aria (*motori a testa incandescente*). Contiene come accessori le *valvole di aspirazione V* e *di scarico V'* entrambe comandate da *camme* (specie di dischi con gobba eccentrica) *c* e *c'* che le aprono a tempo opportuno. I motori a gas hanno annesso un gassogeno ove con la combustione speciale di un combustibile si ottiene il gas da bruciare nel motore. In quelli a benzina il combustibile passa (per l'aspirazione stessa che, come vedremo, fa lo stantuffo nel primo tempo) attraverso un apparecchio detto carburatore ove si forma la miscela conveniente di aria e di benzina. In quelli a petrolio si aspira prima aria e poi con una pompetta si inietta il petrolio.

Fig. 110. - *R*, *P* ed *R'* sono collegati fra loro e collo stantuffo in modo che si producano nella successione voluta il funzionamento secondo i quattro tempi indicati.

Il funzionamento del motore si compie in quattro tempi:

Primo tempo (*Aspirazione*). Lo stantuffo è in alto, discende, la valvola *V* si apre e l'aria mescolata a gas combustibile viene inspirata e riempie il cilindro.

Secondo tempo (*Compressione*). Lo stantuffo risale, la valvola *V* si chiude per l'azione di una molla, il miscuglio detonante si comprime nello spazio (detto camera di esplosione) che lo stantuffo lascia al di sopra di sè, quando è al termine della sua corsa. Alla fine di questo secondo tempo il meccanismo del motore determina per mezzo di una scintilla elettrica od altrimenti l'accensione della mescolanza. (Servono per la scintilla i due fili rappresentati in alto dalla Fig. 110, la quale rappresenta il tipo di una macchina a benzina).

Terzo tempo (*Espansione*). Lo stantuffo ridiscende, spinto dalla forte pressione determinata dall'esplosione.

Quarto tempo (*Scarico*). Si apre la valvola *V'* mentre la *V* rimane chiusa. Lo stantuffo risale ed i gas provenienti dalla combustione sono mandati all'esterno, attraverso *A'*.

Appare chiaro, da quanto si è detto, che durante uno solo di questi quattro tempi lo stantuffo riceve la forza motrice dal gas. Cosicchè, oltre all'iniziare il moto col conferire un primo movimento al sistema, occorre regolare poi il movimento con un volano, che accumuli l'energia di un tempo d'azione per restituirla negli altri. Il regolatore a forza centrifuga invece — là dove occorra (macchine fisse) — serve, proporzionando la miscela in qualità od in quantità, a variare il lavoro motore in corrispondenza delle variazioni del carico resistente, sì da mantenere quella velocità che si desidera (costante nelle macchine fisse).

Il movimento delle valvole è regolato opportunamente dal moto stesso dell'albero.

Per impedire l'eccessivo riscaldo del cilindro, tutte le macchine a gas od a petrolio sono provviste di inviluppo refrigerante ad acqua. Nelle macchine automobili (a benzina) il refrigerante è l'acqua, ma questa a sua volta, circolando entro tubi, è raffreddata dall'aria che lambisce la loro superficie esterna a nervature.

I combustibili più in uso sono: il gas illuminante, il gas povero (che si ottiene facendo passare una mescolanza di aria e di vapore acqueo su del carbone o dell'antracite portati al rosso), il vapore d'alcool denaturato, il vapore di petrolio e quello di benzina.

§ 115. **Motori Diesel od a combustione a pressione costante.** — Questi motori differiscono dai precedenti perchè nel 1° tempo (andata dello stantuffo) si aspira aria pura, nel 2° tempo (ritorno dello stantuffo) si comprime l'aria (30-32 atm.) la quale si riscalda fortemente sì da bruciare il getto di petrolio greggio (nafta) che viene spinto e polverizzato da un getto d'aria compressa (ad una pressione superiore a quella precedente: fino a 60 atm. e più) da una pompa (annessa alla macchina). La combustione avviene sotto pressione costante durante una piccola frazione della 3ª corsa o 3° tempo, nella cui rimanente parte ha luogo l'espansione. Il 4° tempo (4ª corsa di ritorno) è per lo scarico della miscela. A parte la differente combustione è sostanziale differenza la mancanza assoluta d'organo d'accensione e il maggior rendimento che questi motori danno, perchè a causa della compressione di sola aria si possono raggiungere altissime pressioni progressivamente, condizione ottima per avere un maggior coefficiente economico e per non affaticare soverchiamente gli organi di spinta.

§ 116. **Il principio di Carnot.** — I rapporti fra il calore ed il lavoro delle *macchine termiche* che trasformano in modo continuo calore in lavoro, sono regolati da due principî fondamentali seguenti, detti *Principî della Termodinamica*:

1. *Principio della equivalenza* o della proporzionalità fra il lavoro prodotto e il calore utilizzato, a noi già noto.

2. *Principio di Carnot*, relativo alla proporzione di calore che può

venir convertito in lavoro. Secondo questo principio una macchina termica non può restituire integralmente, sotto forma di lavoro, tutta l'energia calorifica che riceve. Per quanto perfetta essa sia, sotto una parte del calore che riceve viene convertita in lavoro: il resto *necessariamente* mantiene la forma di calore.

Questo secondo principio merita un qualche schiarimento. Ogni macchina, lo si sa, non funziona mai senza perdite o meglio senza che parte della energia che gli si conferisce venga resa inutilizzabile da attriti o altro.

Le macchine termiche subiranno la sorte di tutte le altre, e se,

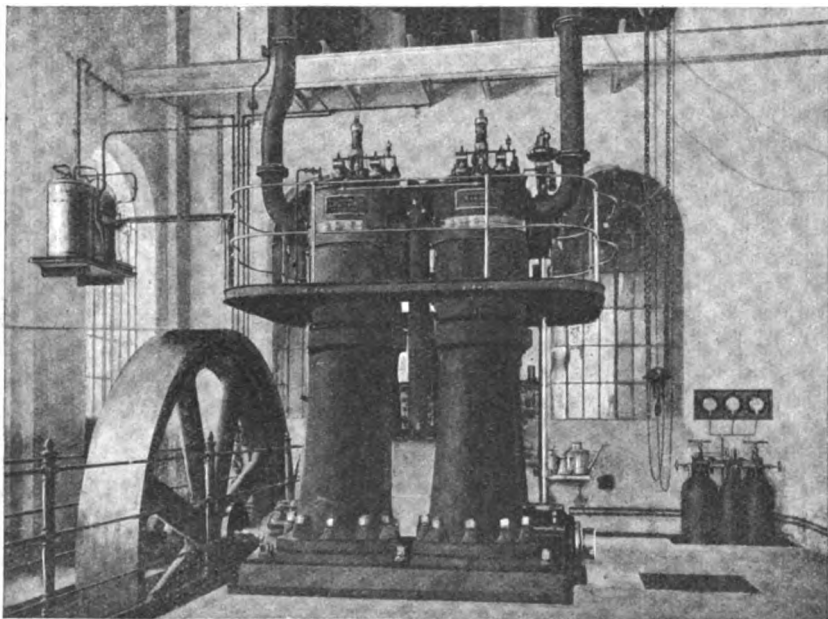



Fig. 111. - Un motore Diesel ad olio pesante, quali oramai se ne hanno numerosi negli stabilimenti industriali.

per chiarezza, ci riferiamo alla macchina a vapore, possiamo più esplicitamente dire che: 1° il calore del combustibile non è tutto ceduto al vapore; 2° una parte soltanto del calore posseduto dal vapore entrato nel corpo di pompa viene convertito in lavoro giacchè una frazione di questo calore passa all'aria libera o nel condensatore; 3° una parte del lavoro effettuato dal vapore viene assorbito dai meccanismi di utilizzazione.

Orbene, tutte queste perdite possono attenuarsi al massimo grado, salvo una: è la perdita che proviene dall'inevitabile passaggio di calore al condensatore o all'aria libera perchè senza condensatore o senza il riversarsi di vapore direttamente nell'aria, equivalente al condensatore, la macchina non funzionerebbe.

Che valore ha questa perdita inevitabile?

Il Carnot calcolò, mediante i dati pur imperfetti che aveva all'epoca sua (1827), le quantità di lavoro L date da differenti macchine e le

quantità di lavoro equivalenti alle quantità di calore corrispondenti Q, fornite dalla sorgente termica e trovò per il rapporto $\frac{L}{EQ_1}$ un numero sensibilmente costante, quando le macchine funzionavano fra i medesimi limiti di temperatura. Si dà il nome di *coefficiente economico* o di *rendimento economico* a questo rapporto; e ora, poichè si sa che L è uguale a $E(Q_1 - Q_2)$ — se Q_2 è la quantità di calore abbandonata al condensatore dopo l'effettuazione del lavoro — si può dare al coefficiente economico la espressione:

$$E\frac{Q_1 - Q_2}{EQ_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \qquad (29)$$

È facile vedere che il *massimo rendimento* si ha quando la macchina termica funzioni in modo che il corpo (qualunque esso sia: aria, vapor acqueo, vapor d'etere) in essa operante subisce trasformazioni, secondo un *ciclo reversibile*, quale è, ad esempio, il *ciclo di Carnot*.

Ed è facile anche dimostrare che il valore di tale coefficiente economico massimo ha per espressione il quoziente della differenza $T_1 - T_2$ della temperatura (assoluta) della sorgente e del refrigerante per la temperatura T_1 della sorgente.

Il principio di Carnot consiste nell'enunciazione del fatto che una trasformazione di calore in lavoro meccanico richiede un passaggio di parte del calore, prelevato dalla sorgente per ottenerne la trasformazione, ad un corpo a temperatura bassa. Questa ultima parte rimane allo stato di calore, intrasformata.

Se una determinata quantità di lavoro meccanico può trasformarsi integralmente in calore, una determinata quantità di calore può parzialmente trasformarsi in lavoro meccanico, il resto rimanendo allo stato di calore ad una temperatura più bassa della iniziale.

§ 117. **La degradazione dell'energia e la morte dell'Universo.** — Il principio suesposto ha suggerito l'idea d'una scala *nobiliare* per le energie; più nobili rispetto ad altre essendo quelle che hanno una maggiore possibilità di trasformazione. L'energia meccanica sarebbe più nobile del calore. Il calore a temperatura più elevata più nobile del calore a temperatura meno elevata.

Fatalmente nelle trasformazioni di energia, che costituiscono i vari fenomeni spontanei, si passa dalle forme più nobili alle meno nobili; si opera cioè una *degradazione dell'energia.*

Verrà il momento — si è profetizzato — che tutta la energia dell'Universo si sarà ridotta a calore a temperatura uniforme sui vari corpi. Nessun fenomeno sarà allora più possibile. L'Universo avrà raggiunto l'ora estrema.

PARTE SECONDA

DELLA LUCE

CAPITOLO XI.

CORPI LUMINOSI ED ILLUMINATI, DIAFANI ED OPACHI.

§ 118. **Luce - Corpi luminosi e corpi illuminati.** — La funzione visiva per parte dell'occhio si esplica in quanto la parte sensibile (retina) del nostro organo di visione è impressionata da un qualche cosa a cui vien dato il nome di *luce* e che sembra diffondersi da quei corpi che noi diciamo *luminosi.*

I corpi che diciamo luminosi mostrano talvolta di essere la sede del fenomeno di produzione della luce; tal altra di rimandar in parte la luce che cada su di essi e non li attraversi se non in piccola quantità. Nel primo caso si dicono luminosi di luce propria o semplicemente *luminosi* (Sole, stelle, fiamme, corpi incandescenti); nel secondo caso si dicono *illuminati.* Si chiamano *oscuri* i corpi che non diffondono luce. Tali possono essere quei corpi suscettibili, per un'azione conveniente, di diventar luminosi di luce propria o suscettibili di essere illuminati. I corpi oscuri, quando vengano illuminati, possono a lor volta rendere luminosi altri corpi oscuri. La Luna ed i pianeti sono corpi oscuri che divengono luminosi per effetto della luce del Sole; la Luna può illuminare notevolmente la Terra. Un foglio di carta bianca che in una camera buia venga colpito da luce, penetrante per una piccola apertura, rende luminosi i vari corpi che lo circondano. Ma è facile osservare che i vari corpi oscuri, colpiti da luce, divengono variamente luminosi. Se si sostituisce al foglio bianco, precedentemente considerato, un foglio nero, o meglio un corpo annerito con nero fumo, la illuminazione dei corpi circostanti viene marcatamente ridotta.

§ 119. **Fenomeni luminosi - Ottica.** — I fenomeni fisici attribuibili alla luce si chiamano *fenomeni luminosi.* La parte della fisica che si occupa dei fenomeni luminosi chiamasi *ottica.*

§ 120. **Corpi trasparenti, corpi translucidi e corpi opachi.** — Per rapporto alla luce si deve far distinzione fra *corpi opachi* e *corpi diafani* o *trasparenti.*

I primi son quelli che non si lasciano attraversare dalla luce e gli altri quelli che si lasciano attraversare. Va però notato subito come la luce non sia mai totalmente intercettata da un corpo, nè totalmente trasmessa. Inoltre i corpi di ugual spessore lasciano passare in misura varia la luce e d'altro canto diversi possono essere i gradi di trasparenza d'un corpo. Così un vetro ben pulito è trasparente più di uno appannato o polveroso e una massa d'acqua limpida è più trasparente di una massa d'acqua torbida.

Le singole varie sostanze hanno anche gradi di trasparenza diversa a seconda dello spessore. L'oro, per esempio, che in spessore non troppo piccolo è opaco, diviene trasparente, se ridotto in lamina sottilissima.

Si deve quindi, a rigore, parlare di vari gradi di trasparenza nei vari corpi a parità di spessore e in un medesimo corpo a seconda delle condizioni nelle quali è posto.

E forse è lecito pensare ad una scala di infiniti gradi di trasparenza, dalla condizione di completa opacità a quella di completa trasparenza. In pratica però si parla grossolanamente di corpi opachi e di corpi trasparenti, includendo fra essi, come condizione intermedia, quella dei corpi *translucidi*.

Si suole distinguere il corpo trasparente, propriamente detto, dal cosidetto corpo pellucido e translucido. Il primo lascia distinguere nettamente attraverso ad esso, col dar adito alla luce, i contorni del corpo luminoso, che attraverso all'altro appaiono invece indecisi. Sono pellucidi o translucidi un foglio di carta unta, un vetro smerigliato e simili.

§ 121. **Luce bianca e luci colorate - Luce monocromatica.** — La considerazione della trasparenza dei corpi ci permette fin d'ora di fissare la nozione della esistenza di varie qualità di luce e ci fa pensare che la luce solare ordinaria debba essere luce composta di varie altre. Basta infatti far passare della luce solare attraverso quei vetri, che sono detti comunemente *colorati*, per ottenere su di un foglio di carta bianca, posto dopo al vetro, una colorazione varia, a seconda del vetro usato. È ovvio ritenere che il vetro abbia fatto l'ufficio di filtro, lasciando passare solo una o solo alcune delle luci, componenti la luce solare.

Con procedimenti dei quali parleremo più avanti è difatti possibile decomporre la luce solare in una infinità di luci non ulteriormente decomponibili e che perciò si chiameranno *luci semplici*. Esse, cadendo su di uno schermo, che appaia bianco alla luce solare, danno una impressione di colore, caratteristica per ciascuna di esse e che fa dare alla luce che la genera il nome stesso di quel colore.

La luce solare ed ogni altra che si comporti come essa, sarà quindi denominata, secondo la indicata regola, *luce bianca*. Una delle luci semplici che la costituiscono sarà o rossa o verde o aranciata, a seconda del colore cui dà origine, cadendo su di un corpo bianco. Le luci semplici, non decomponibili cioè ulteriormente, si chiamano anche *luci monocromatiche*.

CAPITOLO XII.

PROPAGAZIONE DELLA LUCE.

§ 122. **Propagazione rettilinea della luce in un mezzo trasparente ed omogeneo.** — Se pratichiamo un'apertura nello scuro di una finestra chiusa, colpita direttamente dalla luce solare, scor-

giamo nell'interno dell'ambiente buio una striscia (Fig. 112) rettilinea, intensamente luminosa, che andrà a colpire il piancito dell'ambiente o una delle pareti. Codesta striscia deve la sua luminosità, (com'è facile constatare, osservandola attentamente) a ciò, che la luce che penetra nell'ambiente rende intensamente luminose le particelle di pulviscolo atmosferico che incontra nel suo cammino. La luminosità sua potrà così accrescersi fino ad una certa misura, aumentando con un artificio qualunque la polvere diffusa nell'aria. Orbene, il cammino che rivela la luce solare penetrante nell'ambiente appare decisamente rettilineo. Constatazione importante questa, che conduce ad ammettere, in prima approssimazione, che la luce in un mezzo trasparente ed omogeneo si propaghi in linea retta.

Fig. 112.

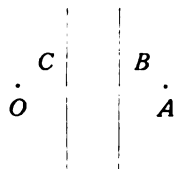



Fig. 113.

Non solo con tale esperienza si pone in rilievo la propagazione rettilinea della luce; ma con molte altre facilmente eseguibili e con numerose osservazioni di fatti naturali.

Così, ad esempio, perchè arrivi all'occhio di un osservatore situato in O la luce proveniente da una sorgente luminosa A, attraverso a due schermi forati in B e C rispettivamente, bisogna che O, A, B e C si trovino in linea retta (Fig. 113).

§ 123. **La propagazione rettilinea non è che approssimativa - Ottica geometrica ed ottica fisica.** — A proposito delle esperienze indicate nel paragrafo precedente va detto che ad esse non si può riconoscere la caratteristica di esperienze precise. Il valore limitato della loro precisione ci obbliga a ritenere solo approssimata la conclusione alla quale conducono. E che la propagazione della luce sia rettilinea solo in via approssimata, lo dimostrano direttamente ed indirettamente tutta una categoria di fenomeni ottici interessanti, che fanno parte della cosidetta *ottica fisica*, costituente la seconda parte nella quale si divide lo studio dell'Ottica, la prima chiamandosi *ottica geometrica*. I fenomeni che in questa si studiano non richiedono alcuna nozione od ipotesi sulla natura della luce. Per quelli dell'ottica fisica si richiede invece la nozione od una ipotesi sulla natura della luce.

§ 124. **Raggio luminoso.** — Per comodità di linguaggio è assai frequente l'uso della espressione « raggio luminoso » per indicare una qualunque delle linee lungo cui si consideri nello spazio il propagarsi della luce.

In un mezzo omogeneo i raggi saranno rettilinei. Si deve ben notare che un raggio luminoso isolato, è una direzione geometrica, vale a dire una pura astrazione della nostra mente. Come un corpo si considera costituito da infiniti punti materiali, così un corpo luminoso può immaginarsi costituito da infiniti punti luminosi. E come si considera un punto materiale isolato, si può considerare idealmente un punto luminoso isolato.

Orbene, un punto luminoso manderà tutt'intorno, nello spazio, della luce e potremo anche dire, che tutt'intorno ad esso si diffondono nello spazio, omogeneamente costituito, tanti raggi luminosi, rappresentati dalle infinite rette partenti dal punto luminoso e lungo cui riterremo che si propaghi la luce. Basta difatti pensare che la esperienza della Fig. 113 permette la visione del punto A, qualunque sia la posizione degli schermi, ferma restando la condizione che le aperture, l'occhio ed il punto A, siano in linea retta.

Per il caso d'un corpo luminoso, che diffonda luce da una porzione superficiale, non puntiforme, ma di qualche estensione, si ammette che *si debba considerare ciascuno dei punti di tale porzione come una sorgente puntiforme indipendente, che invii della luce per proprio conto ed i cui effetti non siano influenzati dalla presenza dei punti luminosi vicini.* Anche questo principio, come quello della propagazione rettilinea, va ritenuto come approssimato.

Più raggi luminosi prossimi fra loro costituiscono quello che si chiama un *fascio luminoso.* E più raggi luminosi passanti tutti per un punto

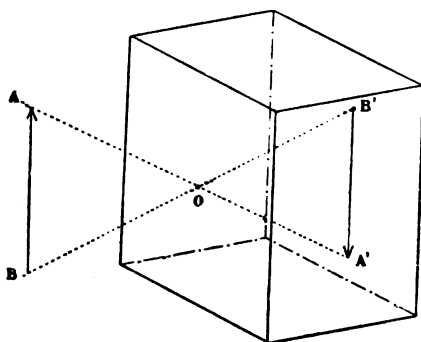
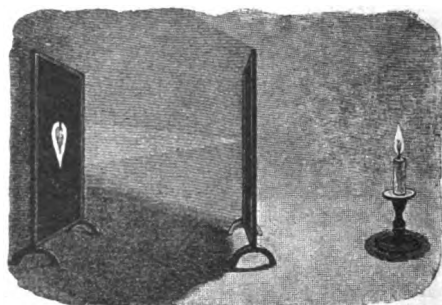



Fig. 114. *Fig. 115.*

(secondo un piccolo cono) costituiscono un fascio conico, che può essere convergente o divergente. In quest'ultimo caso si dice *pennello luminoso.*

Un caso interessante è quello pel quale si abbia un allontanamento indefinito del punto luminoso da cui partono i raggi luminosi costituenti un fascio divergente. Allora l'angolo di divergenza dei raggi estremi è piccolissimo ed i raggi che formano il fascio possono considerarsi *paralleli.* Il fascio si dice allora *cilindrico* o *parallelo.*

§ 125. **Camera oscura.** — Una prova indiretta della propagazione rettilinea della luce si ha nel comportamento della cosidetta *camera oscura* di Giambattista Porta rappresentata dalla Fig. 115 e basata sul fatto che la luce di oggetti luminosi, obbligata a passare attraverso a piccole aperture, va a formare immagini capovolte degli oggetti stessi (Fig. 115). Il fenomeno non può spiegarsi che ammettendo la propagazione rettilinea della luce e l'indipendenza dell'azione dei punti luminosi costituenti l'oggetto. La spiegazione d'altro canto è semplice. Ogni punto dell'oggetto AB irradia luce per proprio conto in tutte le direzioni. La luce compresa nel cono che ha (Fig. 114) il punto A (situato in alto) per vertice e il contorno del foro O per base, è formata

da un'infinità di raggi rettilinei i quali illuminano nel punto A' (situato in basso) una piccola superficie, simile alla superficie del foro. La sua area sta a quella del foro come il quadrato della distanza di $A'B'$ da O sta al quadrato della distanza di AB pure da O. Se questa ultima distanza è grande rispetto alla prima e se l'area del foro è piccola, la porzione di superficie A' illuminata dal punto A risulta così piccola da potersi assimilare ad un punto. A' si dice *immagine* di A.

In queste condizioni ad ogni punto dell'oggetto luminoso corrisponde un punto immagine sulla retta $A'B'$, B' (situato in alto) essendo immagine di B (situato in basso); ed al corpo luminoso AB corrisponde la immagine $A'B'$ capovolta rispetto all'oggetto.

§ 126. **Ombre.** — Anche i fenomeni di ombra dimostrano la propagazione rettilinea della luce.

Se un punto luminoso manda luce tutt'intorno, e se questa incontra nel suo cammino un corpo opaco, una sfera ad esempio, che ne impedisca la propagazione ulteriore, mentre il corpo offre una parte bene illuminata e una parte non illuminata, detta in ombra, si delimita al di là di esso una regione dello spazio, (che nel caso citato avrà forma conica), nella quale non giungerà luce dal punto luminoso. È la cosidetta *regione di ombra* del corpo opaco. Essa sarà compresa al di là del corpo opaco, entro il cono ottenuto mandando dal punto luminoso tutte le rette tangenti al corpo opaco. Può quest'ombra proiettarsi sopra uno schermo posto al di là del corpo stesso e avrà, a seconda delle disposizioni dello schermo, la forma di un cerchio oscuro in campo chiaro, oppure la forma di un'ellissi oscura, pure in campo chiaro.

Fig. 116. - L'ombra del disco AB dovuta al punto estremo L del corpo luminoso è compresa fra M ed N': quella dovuta all'altro punto estremo L' è compresa fra M' ed N. Esse non si sovrappongono interamente. Lo stesso avviene per ogni altra coppia di ombre relative a due altri punti luminosi qualsiasi della sorgente luminosa. Vi ha luogo a considerare una regione centrale nell'ombra dovuta al corpo luminoso ove si sovrappongono parzialmente tutte le ombre relative a tutti i punti luminosi della sorgente. Là si avrà massima oscurità e si dirà che si è nella regione dell'ombra propriamente detta. Tutt'intorno il numero delle ombre elementari che si sovrapporranno parzialmente andrà decrescendo dalla regione centrale verso la periferia. Da ciò una regione sfumata detta *penombra*.

Se invece d'un punto luminoso si tratta d'un corpo luminoso di qualche estensione, i vari punti della (Fig. 116) regione d'ombra e i vari punti dell'ombra proiettata non hanno ugual grado d'oscurità. Il passaggio dalla luce alla oscurità non avviene più bruscamente ed esiste fra l'ombra e la parte illuminata una regione di transizione detta *penombra*, la quale non riceve che una parte dei raggi della sorgente.

La parte che opera tale illuminazione ha un'estensione gradatamente crescente dalla regione di vera e propria ombra (nella quale non perviene affatto luce) alla regione totalmente illuminata. La cosa è chiarita dalla Fig. 116 e dalla relativa leggenda.

Per decidere se un punto appartiene all'ombra, alla penombra o alla parte illuminata da tutti i punti del corpo luminoso, occorre pren-

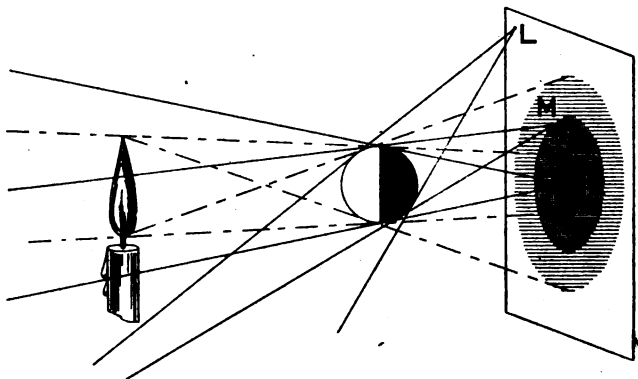



Fig. 117.

dere questo punto (Fig. 117) come vertice d'un cono tangente al corpo opaco. Se tale cono viene a contenere tutta la sorgente luminosa, il punto considerato, vertice del cono, è situato nell'ombra, perchè i raggi luminosi partenti dai diversi punti della sorgente e che potrebbero arrivare nel punto considerato, sono rette contenute nell'interno del cono e tali quindi che incontrano il corpo opaco. Se il cono contiene una porzione soltanto della sorgente, la parte contenuta nell'interno non manda luce

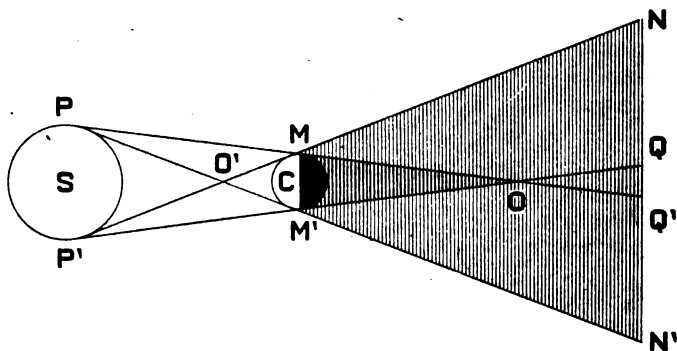



Fig. 118.

al punto, ma la parte della sorgente esterna al cono ne invia; il punto (come il punto *M* della figura) appartiene alla penombra. Finalmente, se il cono non comprende affatto alcuna porzione della sorgente, tutti i punti di questa illuminano il punto considerato (come il punto *L* della figura), il quale è perciò in piena luce. Si vede facilmente che quanto più un punto della penombra è prossimo all'ombra, più debole è la porzione di sorgente che lo illumina. Si passa dunque per gradi continui attraversando la penombra, dall'ombra alla luce completa.

Per una indicazione elementare delle nozioni fondamentali relative alla teoria delle ombre ci si suole riferire al caso in cui la sorgente luminosa ed il corpo opaco siano entrambi sferici e si suole far distinzione fra le due circostanze seguenti:

1. Il corpo luminoso è più piccolo del corpo opaco.
2. Il corpo luminoso è più grande del corpo opaco.

Per entrambe è facile vedere che per avere la limitazione fra la regione d'ombra, la penombra e la regione interamente illuminata si deve condurre il cono *OMM'*, tangente esternamente ai due corpi ed il cono *O'NN'*, tangente internamente.

La porzione di spazio situata al di là del corpo opaco e compresa nel cono *OMM'* costituisce la regione d'ombra. Quella compresa fra il cono *OMM'* ed il cono *O'NN'* costituisce la regione di penombra.

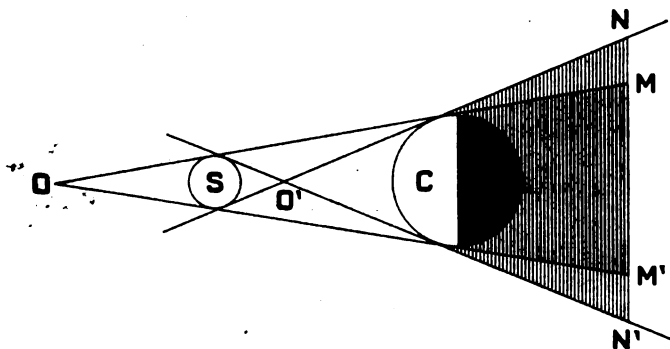



Fig. 119.

Quella esterna al cono *O'NN'* costituisce la regione illuminata interamente.

Nella prima delle due circostanze suindicate la regione d'ombra come quella di penombra è estesa indefinitamente, poichè il vertice *O* del cono *OMM'* precede il corpo luminoso. Nella seconda invece, la regione d'ombra, detta più specialmente *cono di ombra*, è, a differenza della regione di penombra, limitata, perchè il vertice *O* del *OMM'* segue il corpo opaco. Sempre in corrispondenza di questa seconda circostanza va notato che per un occhio posto nella regione di penombra costituita dal prolungamento delle generatrici del cono d'ombra, il corpo luminoso apparirebbe sotto la forma di un anello più o meno regolare, perchè il corpo opaco si proietta interamente su quello luminoso. In ogni altra regione della penombra, il corpo luminoso apparirebbe all'occhio sotto la forma di *falce*, perchè dal punto sul quale fosse situato l'occhio il corpo opaco non si proietterebbe che parzialmente sul corpo luminoso.

§ 127. **Applicazioni delle nozioni fondamentali sulle ombre - Eclissi.** — In geometria descrittiva, la determinazione delle ombre sui disegni in prospettiva facilita l'intelligenza del disegno, facendo meglio percepire il rilievo dei corpi rappresentati.

L'altezza di un edificio illuminato dal Sole può determinarsi approssimativamente, misurandone la lunghezza dell'ombra proiettata e confron-

tandola alla lunghezza dell'ombra proiettata da un regolo verticale di nota altezza. Con questo metodo e con l'ammirazione del re Amassi, Talete di Mileto avrebbe misurata l'altezza degli obelischi egiziani.

Fig. 120.

L'altezza delle montagne lunari si valuta dall'osservazione delle loro ombre proiettate. Tale valutazione si fa sulle fotografie effettuate della Luna, misurandone le ombre.

Le note eclissi, che tanta cagione di terrore dettero nei tempi passati, sono dovute a giuochi di ombra. Il Sole (Fig. 120) si eclisserà totalmente per una regione della Terra, quando questa regione entrerà nel cono d'ombra della Luna; subirà l'eclisse parziale se entrerà nella regione di penombra; l'eclisse sarà poi anulare se il punto della Terra si troverà nella falda di cono che è compresa dal prolungamento delle

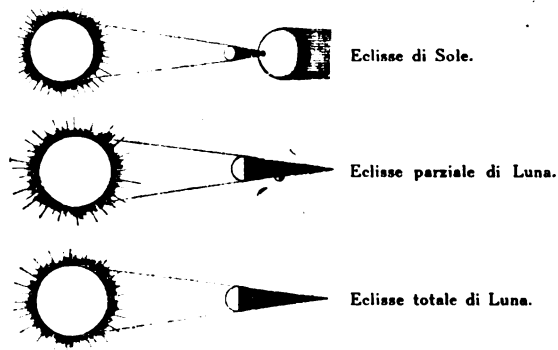
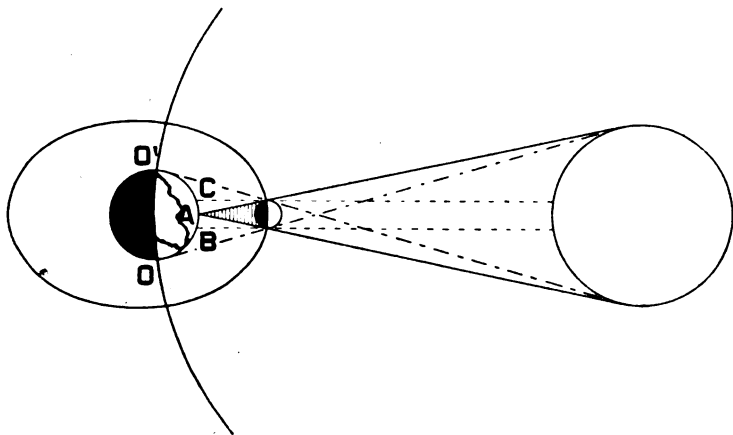



Fig. 121.

generatrici del cono d'ombra. La Luna si eclisserà parzialmente o totalmente quando entrerà in parte o totalmente nel cono d'ombra della Terra, dovuto alla opacità di questa per i raggi del Sole.

Le eclissi di Sole non sono visibili che in qualche luogo della superficie della Terra e nei vari luoghi non appariscono alla stessa maniera. Se sulla Terra rappresentata dalla Fig. 121 si considerano vari punti *A*, *B*, *C*, *O* si vede che l'eclisse è totale in *A*, parziale in *C* e *B*, invisibile in *O*.

Le eclissi di Luna invece sono visibili allo stesso modo da tutti gli abitanti dell'emisfero dal quale si percepisce la Luna nel momento in cui essa si eclissa.

Non vanno soggetti ad eclisse soltanto la Luna e il Sole. Spesso

si notano eclissi in altri astri, quando questi vengano momentaneamente nascosti al Sole od alla Terra da un altro corpo.

§ 128. **Velocità di propagazione della luce.** — La luce attraversa lo spazio con una rapidità tanto grande, che si è creduto per lungo tempo ch'essa si propagasse istantaneamente da un punto all'altro. Ora si può dire che la luce percorre 300000 chilometri per secondo.

Una palla di cannone metterebbe dieci anni per arrivare al Sole, mentre che la luce percorre la medesima distanza in 8 minuti. L'uccello più rapido, volando a tutta velocità, impiegherebbe circa tre settimane a fare il giro della Terra; la luce percorre il medesimo cammino in meno tempo che non l'uccello a fare un sol battito d'ali. La sua rapidità non è comparabile che alla distanza che talvolta deve percorrere. E infatti,

Fig. 122. - Metodo astronomico di Roemer. - Il pianeta Giove impiega circa 12 anni a compiere la sua rivoluzione attorno al Sole *S*, mentre la durata della rivoluzione della Terra è, come ben si sa, di un anno; perciò, in questo tempo, nel quale Giove percorre solo poco più della 12ª parte della sua orbita, la Terra trovasi una volta ad una distanza minima ed una volta ad una distanza massima. La differenza *EE'* fra queste distanze uguaglia il diametro dell'orbita terrestre. Parecchi satelliti girano attorno a Giove, sensibilmente nello stesso piano. Il satellite più vicino a Giove si chiama il primo satellite. In ciascuna delle sue rivoluzioni attraversa il cono d'ombra di Giove e diventa per qualche tempo invisibile. Il tempo θ che trascorre tra le due immersioni, cioè tra gli inizi di due eclissi consecutive, è la durata della rivoluzione del satellite ed ha il valore di 42 ore 22 minuti 35 secondi. Se si nota l'istante t d'una immersione mentre la Terra E è in congiunzione con Giove, si potrà calcolare l'istante della $(n+1)^a$ immersione che debba aver luogo allorchè la Terra E' sia in opposizione con Giove. Questo istante sarebbe $t + n\theta$ se la Terra e Giove fossero alla stessa distanza come al momento della prima immersione e l'osservazione coinciderebbe col calcolo. Viene invece constatato un ritardo di più di 16 minuti. Questo ritardo misura evidentemente il tempo che la luce mette a percorrere il diametro dell'orbita terrestre. Noto questo diametro si può colla nozione di tale ritardo calcolare la velocità di propagazione della luce.

le stelle sono sì lontane che la luce, malgrado la sua velocità, impiega parecchi secoli per arrivare da talune di esse fino a noi.

Un astronomo danese, il Roemer dimostrò per primo (nel 1675) che la luce impiega un certo tempo per propagarsi: le sue osservazioni gli permisero di stabilire che essa va dal Sole alla Terra in 8 minuti e 18 secondi e di passare quindi alla misura della velocità di propagazione della luce (Fig. 122).

Dopo lui l'astronomo Bradley, appoggiandosi su di un altro fenomeno astronomico, misurò in nuova maniera la rapidità della propagazione della luce.

I *metodi astronomici* di misura della velocità della luce hanno fornito valori che si possono sensibilmente riferire al vuoto degli spazi interplanetari, come mezzo ambiente attraversato dalla luce.

Oltre a metodi astronomici si son potuti usare *metodi fisici* coi quali dopo il 1848, due fisici, Fizeau e Foucault, riuscirono a misurare, per mezzo di due processi diversi, la durata della trasmissione della luce tra due punti della Terra poco distanti l'uno dall'altro. Di essi indicheremo succintamente quello ideato dal Fizeau e detto della *ruota dentata* (Fig. 123), e quello dello *specchio girante* ideato dal Foucault (Fig. 124).

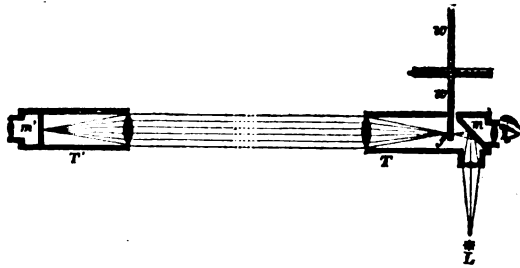



Fig. 123. - *Metodo della ruota dentata.* - La luce d'una sorgente L arriva dopo riflessione su una lastra di vetro m inclinata su di uno specchio m' che la rimanda normalmente sulla direzione incidente. Una ruota dentata w è interposta sul cammino della luce e vien messa in rotazione. Attraverso al vetro piano m si possono ricevere nell'occhio i raggi rimandati da m'. Se la ruota dentata si muove abbastanza rapidamente in modo che nell'intervallo di tempo necessario per l'andata e il ritorno della luce da m' ad f, un dente piano della ruota sia sostituito all'intervallo che lo precede, tutta la luce rimandata da m' sarà arrestata nel cammino di ritorno, e l'occhio non vedrà nulla. Se si conosce la velocità di rotazione che si deve dare alla ruota perchè questa eclisse si produca, se ne deduce il tempo necessario alla propagazione della luce tra m' ed f, e in conseguenza determinando la distanza $m'f$ la velocità di propagazione della luce.

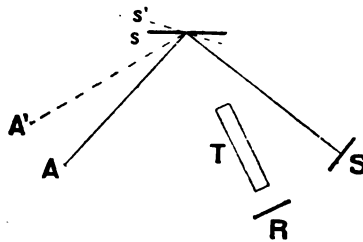



Fig. 124. - *Metodo dello specchio girante.* - La luce emessa da una sorgente A cade dapprima su di uno specchio s che è messo in movimento di rotazione rapidissimo. Dopo riflessione cade normalmente su di uno specchio fisso S che la rimanda sulla direzione incidente; ma allorchè la luce ritorna in s, lo specchio ha girato d'un certo angolo ed è andato in s', in maniera che la luce al ritorno è riflessa in una direzione, diversa dalla direzione di emissione e giunge in A'. Dallo spostamento AA' si viene a conoscere l'angolo di cui ha rotato lo specchio, e se si conosce la sua velocità se ne deduce il tempo di propagazione della luce sulla distanza ss' andata e ritorno. Dividendo questa distanza per il tempo si ottiene il valore della velocità di propagazione di luce. Questo dispositivo sperimentale si presta molto facilmente alla comparazione delle velocità di propagazione in mezzi differenti. Si possono difatti disporre due specchi fissi R ed S alla stessa distanza dallo specchio girante e intercalare davanti ad uno di essi un tubo T pieno d'acqua per esempio. Ciascuno dei due specchi R ed S, contribuisce a dare un fascio di ritorno; questi due fasci non sarebbero distinti se i tempi di propagazione della luce secondo sS od sR fossero uguali; al contrario se questi tempi sono differenti ogni fascio sarà deviato d'un angolo proporzionale al tempo corrispondente. Se si fa la esperienza coll'acqua si trova che il fascio di ritorno che ha attraversato l'acqua è più deviato di quello che ha attraversato l'aria. Ne risulta che la velocità di propagazione della luce è più piccola nell'acqua che nell'aria.

§ 129. **Natura della luce.** — Il metodo del Foucault consentì la misura della velocità della luce in mezzi differenti. Con esso si potè, quale primo risultato, confrontare la velocità di propagazione nell'aria, con quella nell'acqua, stabilendo che la velocità di propagazione della luce nell'acqua è minore della velocità di propagazione nell'aria. Questa conclusione avvalorò la teoria, detta *ondulatoria*, che ora è generalmente ammessa, sulla natura della luce e sostituì vantaggiosamente un'altra teoria, detta della *emissione*, che fu ammessa a lungo pel passato e secondo la quale la luce sarebbe un fluido corpuscolare (materia speciale non pesante, costituita da piccole parti) proiettato in linea retta e con grande velocità dai corpi luminosi.

La teoria attuale ritiene che la luce si debba ad un moto vibratorio di corpuscoli speciali, interessanti la costituzione delle ultime particelle dei corpi luminosi. Tale moto vibratorio si propagherebbe per moto ondulatorio trasversale di un qualche cosa che non sarebbe materia,

che sarebbe dotato di grandissima elasticità, che si troverebbe diffuso per tutto l'Universo ed infiltrato finanche fra le molecole e gli atomi dei corpi, al quale si è dato il nome di *etere cosmico*. A questo modo di vedere obbligano i fenomeni studiati nell'ottica fisica (Cap. XXIII).

§ 130. **Fissato il mezzo, la velocità di propagazione è diversa per le varie luci.** — Sul conto della velocità della luce dobbiamo aggiungere come per un medesimo corpo attraversato, tale velocità sia diversa per le diverse luci semplici, e come per una medesima luce sia varia per i vari corpi attraversati.

CAPITOLO XIII.

FOTOMETRIA.

§ 131. **Intensità luminosa.** — Consideriamo una sorgente luminosa O puntiforme. Tutt'intorno irradi la luce ugualmente per ogni direzione. Facendo centro in O, immaginiamo di tracciare una superficie sferica di raggio pari ad 1 cm. e di segnare su questa una circonferenza che limiti un cerchio di un cmq. di area. Congiungendo i vari punti di tale circonferenza con O, otteniamo un cono che, come si dice, comprende un *angolo solido* unitario e che limita un flusso continuo di luce da O, qualora questo si mantenga costantemente luminoso. Se si fa crescere gradatamente l'area del cerchio considerato sulla superficie sferica, aumenterà pure gradatamente l'angolo solido corrispondente. Quando l'area sia diventata l'intera superficie sferica, l'angolo solido sarà diventato quell'angolo, sotto il quale dal punto luminoso si vede tutto lo spazio circostante attraverso all'intera superficie sferica. Essa, secondo una nota formola geometrica, ha per valore 4π. Si conviene di dire che dal punto O parte un flusso totale di luce Φ e di definire l'*intensità della sorgente luminosa O*, dicendo che essa è il flusso luminoso emanante dalla sorgente secondo un cono che racchiude un angolo solido uguale all'unità. In altre parole si può dire che la intensità della sorgente è la quantità di luce che viene inviata normalmente dalla sorgente stessa sopra una superficie unitaria, posta all'unità di distanza. Questa definizione vale anche per una sorgente non puntiforme, ma di una certa estensione, quali sono le sorgenti luminose reali. Se I rappresenta tale intensità, si potrà scrivere $\Phi = 4\pi I$.

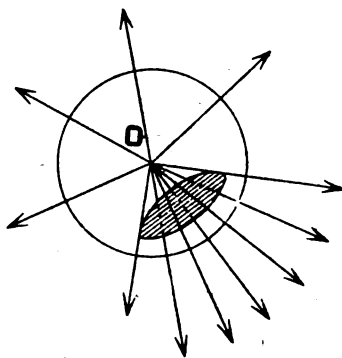



Fig. 125.

Per il caso delle sorgenti irradianti non ugualmente nelle diverse direzioni, si considera l'intensità della sorgente nelle varie direzioni, riferendosi alla unità di superficie, che abbia il centro situato sulla direzione considerata.

§ 132. **Fotometria - Illuminamento.** — La *fotometria* ha per fine il confronto delle *quantità di luce.* Due quantità di luce si dicono uguali se, cadendo su due superfici piane della medesima estensione, nelle medesime condizioni di inclinazione, producono illuminamenti uguali.

Ognuno sa che cosa significhi dire che un oggetto è più o meno illuminato. Quando si illumini successivamente una medesima camera per mezzo di differenti sorgenti luminose poste nel medesimo luogo: candela, becco a gas, lampada elettrica ecc., gli oggetti ed i muri ci appaiono più o meno illuminati. Del pari, illuminando con una candela un foglio di carta bianca ed allontanando successivamente questo da quella, osserviamo subito e facilmente la diminuzione dell'illuminamento del foglio. Ma se il nostro occhio può giudicare del diverso illuminamento dei corpi, non riesce ad apprezzare il rapporto numerico di due illuminamenti, a meno che questo rapporto non sia l'unità e si tratti quindi di corpi ugualmente illuminati. Tutte le misure fotometriche si effettuano cercando di raggiungere l'uguaglianza di due illuminamenti, uguaglianza giudicata tale dal nostro occhio.

Il flusso parziale φ, che cada su di una superficie di area s è il prodotto dell'intensità I per l'angolo solido ω, sotto il quale dal punto O si vede questa superficie: $\varphi = I\omega$. Questo flusso produce un *illuminamento* della superficie s, che ci conviene di esprimere col rapporto:

$$\frac{\varphi}{s} = e. \tag{30}$$

L'illuminamento di una superficie è infatti definito come il rapporto fra la luce che investe questa superficie (cioè il flusso che la raggiunge) e l'area della superficie stessa.

È facile desumere col ragionamento che l' *illuminamento prodotto da una sorgente su di uno schermo varia in ragione inversa del quadrato della sua distanza dallo schermo.* Difatti, se consideriamo una sfera di raggio R descritta attorno al punto O, il suo illuminamento è

$$\frac{\Phi}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}. \tag{31}$$

Questa relazione esprime appunto che l'illuminamento di una superficie varia in ragione inversa del quadrato della distanza R, allorchè il flusso cade normalmente sulla superficie. La cosa vale anche per le sorgenti reali non puntiformi.

§ 133. **Legge di Keplero.** — Se, invece di considerare l'*illuminamento,* si considera la quantità di luce che cade da uno schermo uniformemente illuminato, si può dire che *la quantità di luce* Q *ricevuta da uno schermo uniformemente illuminato da raggi ad esso normali, provenienti da una certa sorgente, è proporzionale all'area* S *dello schermo, all'intensità* I *della sorgente e inversamente proporzionale al quadrato della distanza dello schermo dalla sorgente.* Questa è la *legge di Keplero,* che può evidentemente formularsi nel modo seguente:

$$Q = \frac{IS}{d^2}. \tag{32}$$

Si può approssimativamente verificare questa legge con l'esperienza, mettendo in una camera buia una candela davanti ad un muro verticale

ed interponendo fra candela e muro (parallelamente al muro) un piccolo schermo opaco $ABCD$ che si manterrà a distanza costante dal muro. Questo schermo intercetta una parte Q della luce che emana dalla candela e proietta la sua ombra di estensione S sul muro.

È facile constatare (il che del resto è geometricamente evidente con una misura diretta) che la superficie $ABCD$ dell'ombra è quattro, nove, sedici volte più grande dell'area primitiva S, quando la distanza della candela dal muro è rispettivamente doppia, tripla, quadrupla della sua distanza primitiva. Lo schermo riceve dunque, quando la prima distanza è doppia della seconda, altrettanta luce quanta ne riceverebbe (se esso si togliesse) una superficie di muro quattro volte più grande: è quattro volte più illuminato in ogni punto. Esso riceve, quando la distanza è tripla, altrettanta luce quanta ne riceverebbe una estensione di muro nove volte più grande: è nove volte più illuminato in ciascun punto. E così via.

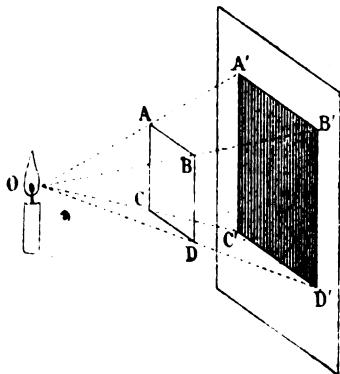



Fig. 126.

§ 134. **Legge di Lambert.** — Se lo schermo, invece di ricevere la luce normalmente, la riceve in una direzione che faccia un angolo α con la normale allo schermo medesimo, si ha la *legge di Lambert,* la quale dice che *a parità di tutte le altre circostanze, la quantità di luce ricevuta è proporzionale al coseno dell'angolo* α.

Si può dunque scrivere in generale:

$$Q = \frac{IS \cos \alpha}{d^2}. \qquad (33)$$

§ 135. **Principio fondamentale della fotometria.** — Una conseguenza immediata della legge di Keplero per il caso di luce diretta normalmente su di uno schermo e della legge di Lambert per il caso di luce diretta obliquamente è la seguente: *le intensità di due sorgenti luminose stanno fra di loro nello stesso rapporto dei quadrati della distanza che hanno da un medesimo schermo da esse ugualmente illuminato normalmente o con uguale obliquità.* Sieno difatti I ed I' tali intensità, D e D' le distanze. L'illuminamento, uguale per parte delle due sorgenti, è espresso separatamente per le due sorgenti $\frac{I}{D^2}$ e da $\frac{I'}{D'^2}$. Potendosi scrivere $\frac{I}{D^2} = \frac{I'}{D'^2}$ sarà anche:

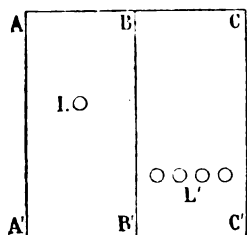
$$\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}, \qquad (34)$$

il che esprime ciò che si voleva dimostrare. Ci si può persuadere sperimentalmente del principio suindicato del quale i metodi fotometrici usati sono una applicazione immediata, operando nel modo seguente:

Tre assicelle verticali, AA', BB', CC', sono elevate (Fig. 127) su una tavola; esse formano due compartimenti che si chiudono per mezzo di un vetro ABC smerigliato, ugualmente verticale e diretto perpendicolarmente alle assicelle.

Se si pone in uno dei compartimenti una candela L, per modo che illumini in un certo modo il tratto AB; al fine di avere ugualmente illuminato l'altro tratto BC dello schermo con sorgenti poste nel secondo compartimento a distanza doppia, tripla ecc. dallo schermo della distanza di L, bisogna porre rispettivamente quattro, nove ecc. candele uguali ad L; sorgenti luminose cioè d'intensità rispettivamente doppia, tripla, quadrupla di quella di L.

Fig. 127.

Si può dire che questa verifica sperimentale del principio fondamentale della fotometria, che è conseguenza della legge di Keplero, dimostra sperimentalmente anche questa legge.

§ 136. **Fotometri.** — Il principio dimostrato nel precedente paragrafo serve a valutare l'intensità di una sorgente luminosa per confronto coll'intensità nota di altra sorgente. Si usano a tal fine i così detti *fotometri.*

Fotometro di Bouguer. — Il dispositivo della Fig. 127 usato nel precedente paragrafo costituisce il *fotometro di Bouguer.*

Si pongono le due sorgenti luminose una da un lato e l'altra dall'altro del diaframma B' e si spostano finchè le due metà della lastra di vetro appariscano ugualmente illuminate. Si misurano per mezzo di regoli graduati le distanze d e d' della lastra dalle due sorgenti. Si scriverà allora $\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}$. Noti I, d e d', si calcola facilmente I'.

Fotometro di Foucault (Fig. 128). — È una modificazione del fotometro di Bouguer. Il setto mediano non è fisso, ma può spostarsi dalla lastra translucida perpendicolarmente a questa e permette di ottenere, con una distanza conveniente, che le due sezioni illuminate siano contigue e non separate o da un tratto oscuro, come nel fotometro di Bouguer quando il setto sia troppo vicino, o da un tratto luminoso quando sia troppo lontano. Così si giudica meglio dell'uguaglianza dell'illuminamento per parte delle due sorgenti. Per obbligare l'occhio a guardare normalmente, si adatta spesso (Fig. 129)

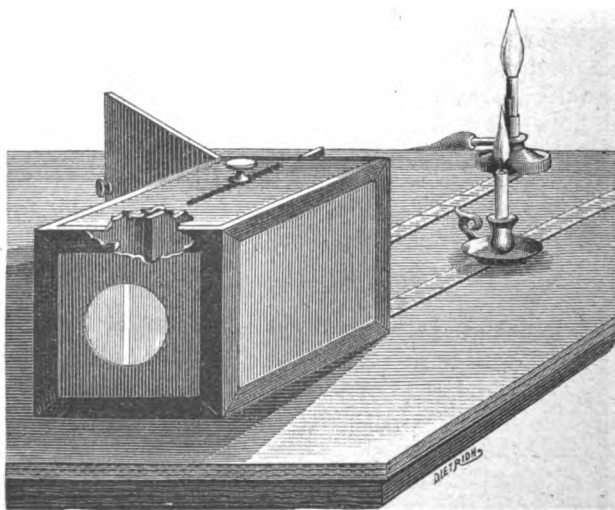



Fig. 128.

Fig. 129.

di fronte al diaframma translucido E una specie di padiglione, all'estremità del quale si pone l'occhio O sulla normale al centro dello schermo stesso.

Fotometro di Rumford. — Consiste (Fig. 130) in uno schermo bianco A, dinanzi al quale si pone un'asticciuola opaca Q, un bastone di legno annerito, per esempio. Ciascuna delle due sorgenti luminose (una di intensità nota) N ed M dà sullo schermo un'ombra del bastone. Disponendo convenientemente queste sorgenti e allontanando più o meno una di esse, si rendono le ombre contigue e di uguale intensità. Le due sorgenti producono allora uguali illuminamenti dello schermo, poichè la parte dello schermo che si trova nell'ombra portata da una delle sorgenti è illuminata dall'altra soltanto. In questa condizione di cose si opera come nei casi precedenti.

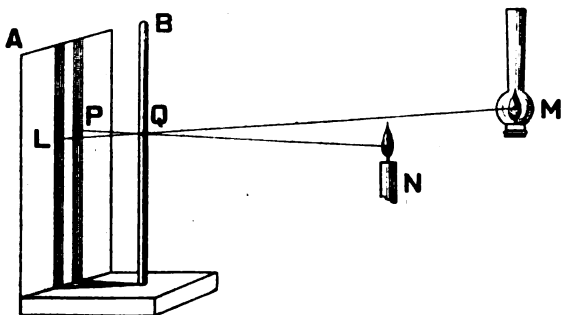
Fig. 130.

Fotometro di Bunsen. — È basato sulla seguente proprietà. Se si fa una macchia con un corpo grasso su di un foglio di carta bianca ordinaria, questa macchia, essendo più translucida e meno diffondente del resto del foglio, apparirà scura su fondo chiaro quando il foglio è più illuminato davanti che di dietro e al contrario chiara su fondo scuro nel caso inverso. Apparirà come il fondo, vale a dire scomparirà alla nostra vista, qualora il foglio sia ugualmente illuminato dalle due parti. Orbene, il fotometro di Bunsen consiste (Fig. 131) in un foglio di carta bianca C, teso in una cornice e macchiato con grasso nella sua regione mediana M. Il foglio è collocato perpendicolarmente alla linea che congiunge i centri delle due sorgenti luminose da confrontare, mentre la macchia ha il suo centro su tale linea. Spostando opportunamente una delle due sorgenti S' lungo la linea suindicata, mentre l'altra S ha posizione conveniente, si arriva ad ottenere l'apparente scomparsa della macchia. Misurando in questa condizione le distanze delle due sorgenti dallo schermo usato, si applicherà come nei casi precedenti il principio fondamentale della fotometria.

Fig. 131.

§ 137. **Spettrofotometri.** — Le misure fotometriche effettuate nei modi suindicati portano a risultati attendibili se le luci delle sorgenti confrontate sono almeno sensibilmente dello stesso colore.

Per misura rigorosa si deve riconoscere che tale condizione è assai raramente soddisfatta. In tal caso si opera il confronto separatamente per le diverse luci semplici che compongono le luci composte delle due sorgenti prese in esame. A tal fine servono certi strumenti detti *spettrofotometri.*

§ 138. **Splendore.** — Due sorgenti luminose (una lampada ad olio ed una ad acetilene, una lampada elettrica ad incandescenza ed un becco Auer a gas) possono apparire di uguale intensità secondo una certa direzione, ma può succedere che all'occhio appariscano ben differenti, l'una più splendente perchè meno estesa dell'altra.

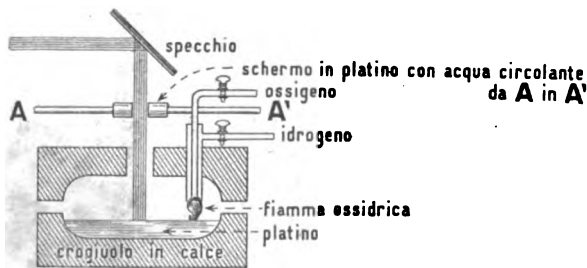
A caratterizzare sotto questo punto di vista una sorgente si usa il cosidetto *splendore* (taluni dicono splendore intrinseco) misurato dal rapporto della intensità I nella direzione considerata, alla superficie apparente S della sorgente in questa direzione.

§ 139. **Unità di luce.** — Fino al 1881 si usò largamente (specialmente in Francia) come unità di intensità, l'intensità orizzontale di una *lampada Carcel,* il cui consumo era di 42 grammi d'olio di colza depurato all'ora. Si usò anche la *candela etoile,* che è inutile definire.

In Inghilterra si fece uso della candela di *spermaceti* (bianco di balena purificato) da 6 alla libbra inglese, che consuma 120 grani (gr. 7,77) all'ora. In Germania si usò la candela di *paraffina* da 12 al chilogrammo, con diametro e condizioni di combustione determinati. Si usò e si usa anche la *lampada Hefner,* che brucia acetato di amile e la *lampada Vernon Harcourt* al pentano, agenti in condizioni ben prescritte.

L'uso di questi vari campioni portava una certa confusione, alla quale si aggiungeva l'altro inconveniente che essi lasciavano alquanto a desiderare per la costanza.

Fig. 132.

Nel Congresso internazionale degli Elettricisti riunito a Parigi nel 1881 il Violle propose (e il Congresso accettò provvisoriamente) di prendere per unità *l'intensità, misurata in direzione normale, di un centimetro quadrato di platino puro alla temperatura di fusione (1700° circa).*

L'unità così indicata presenta dei caratteri di costanza e di determinatezza quasi perfetti. Il campione di essa può realizzarsi come mostra la Fig. 132. Confronti accurati hanno mostrato che l'unità *Violle* vale 2,08 *Carcel* e inversamente la *Carcel* è 0,48 del *Violle.*

Il *Violle* è spesso troppo grande per i bisogni della pratica. Per questo il Congresso degli Elettricisti del 1889 ha deciso di conservarlo come unità scientifica, ma di adottare come unità pratica la *candela decimale,* definita come la ventesima parte del *Violle.* Taluni la chiamano *pyr* ed è sensibilmente 1/10 della *Carcel.* Più esattamente è 1/0,961 *Carcel,* 1/1,22 candele tedesche, 1/1,08 candele inglesi, 1/0,895 unità *Hefner,* 1/9,95 unità *Vernon Harcourt.*

Quale unità di flusso si usa il *lumen*, definito come il flusso emesso in un angolo solido uguale all'unità da una sorgente di una candela o *pyr*.

Quale unità di illuminamento si usa il *lux* o *candela-metro*, definito come l'illuminamento prodotto dal flusso di un *lumen*, che cada sulla superficie di un metro quadrato.

§ 140. **Alcuni dati numerici.** — Per leggere e scrivere senza sforzo è necessario un illuminamento pari a 10 candele comuni, posto ad un metro di distanza. Su di una tavola convenientemente esposta alla luce del giorno l'illuminamento è circa come quello di 50 candele comuni, poste ad 1 metro di distanza, ossia di una candela a 7 centimetri circa.

In un locale chiuso, per distinguere nettamente gli oggetti, se le sorgenti sono sufficientemente disseminate (lampade da 10 a 16 candele), occorrono 0,5 candele per metro cubo.

Il Sole è un luminare di intensità tale che illumina uno schermo come lo farebbe una sorgente di 77000 candele decimali (o 62000 candele ordinarie) poste ad 1 metro.

La Luna illumina come 1 candela decimale posta a due metri o come una candela comune posta a m. 2,20.

Lo splendore del Sole è 228000 volte quello di una candela comune e 50 volte quello del carbone positivo di una lampada ad arco.

Lo splendore della Luna è un poco inferiore a quello di una candela comune.

CAPITOLO XIV.

LA RIFLESSIONE E GLI SPECCHI PIANI.

§ 141. **Divisione di un fascio luminoso alla superficie di separazione di due mezzi.** — Se un fascio di luce cade sulla superficie di separazione di due mezzi, prendono origine, in generale, i fatti seguenti:

1. Nella regione di incidenza i raggi sono in parte rinviati irregolarmente in tutte le direzioni nel primo mezzo come nel secondo, costituendo ciò che si chiama la *luce diffusa* ed originando il corrispondente fenomeno detto di *diffusione*.

2. Un'altra parte dei raggi, costituenti un fascio a contorni limitati, ritorna nel primo mezzo secondo una via ben determinata: sono i *raggi riflessi*. Il corrispondente fenomeno viene detto di *riflessione*.

3. Parte della luce penetra nel secondo mezzo e a seconda delle condizioni di questo, vi forma uno o due fasci limitati, con direzione ben determinata, costituenti i cosidetti *fasci rifratti*. Il corrispondente fenomeno è detto di *rifrazione*; rifrazione semplice o doppia a seconda che si tratta di uno solo o di due fasci. Corrispondentemente il secondo mezzo è detto *monorifrangente* o *birifrangente*. Se la superficie di separazione è ben levigata, il fenomeno primo (diffusione) riesce trascurabile.

Il terzo fenomeno (rifrazione) non ha luogo se il secondo mezzo è opaco o se, essendo trasparente, sono verificate certe condizioni, delle quali diremo in seguito.

Il secondo fenomeno invece (riflessione) non può mai escludersi totalmente.

Ci occuperemo adesso separatamente dei tre fenomeni di riflessione, di diffusione e di rifrazione.

§ 142. **Riflessione e sue leggi.** — Riferiamoci ad un raggio luminoso e consideriamo un corpo opaco; per maggiore semplicità supponiamo che la superficie di questo sia piana; avvertiamo però subito che ciò che si dirà vale per una superficie comunque incurvata, giacchè sul luogo ove cade il raggio di luce la porzione di superficie che interessa il raggio luminoso è infinitamente piccola ed assimilabile quindi ad una piccolissima superficie piana.

Si tratti, ad esempio, della superficie ben piana e lucida di una lastra d'argento. Il raggio di luce che consideriamo (Fig. 133), diretto

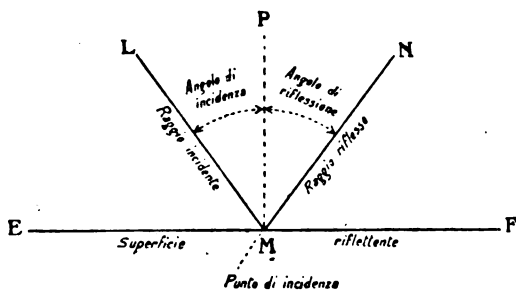
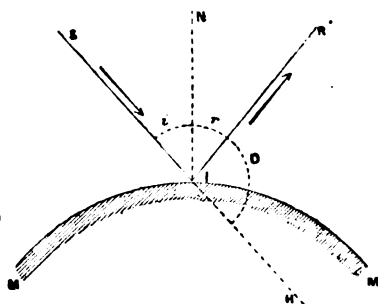



Fig. 133. *Fig. 134.*

verso la superficie riflettente, sia *LM*. Lo si chiama *raggio incidente*, ed *M* si dice *punto di incidenza*.

La luce, dopo aver colpito la superficie riflettente, torna indietro secondo norme precise, che costituiscono le *leggi della riflessione*, per enunciar le quali è opportuno immaginar condotta da *M* la perpendicolare al piano riflettente. Se la superficie fosse curva (Fig. 134) la normale sarebbe la perpendicolare, condotta per il punto di incidenza al piano tangente alla superficie in questo punto.

Innanzi tutto possiamo dire che nel cammino di ritorno, costituente il cosidetto *raggio riflesso*, la luce si mantiene nello stesso piano (detto *piano di incidenza*) determinato dal raggio incidente e dalla normale; piano perpendicolare alla superficie riflettente, poichè contiene la normale ad essa nel punto d'incidenza *M*. Poi dobbiamo aggiungere che nel ritorno la luce si dirige in guisa da formare con la normale alla superficie riflettente un *angolo* (detto di *riflessione*) uguale all'*angolo* (detto angolo di *incidenza*) formato con la stessa normale nel cammino di andata.

Rappresentando la superficie riflettente con la sezione *EF*, ottenuta mediante il foglio sul quale ammettiamo trovarsi il raggio incidente, il fatto della riflessione può indicarsi con la Fig. 133, nella quale sono additati tutti gli elementi che debbono considerarsi nel fenomeno.

Riepilogando, possiamo dire che la riflessione si compie secondo le seguenti leggi:

1. Il raggio riflesso si trova in uno stesso piano col raggio inci-

dente e con la normale alla superficie riflettente, condotta per il punto d'incidenza.

2. L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza.

Caso della incidenza normale. — È chiaro che se il raggio incidente ha direzione perpendicolare alla superficie *EF*, formando esso un angolo di incidenza uguale a zero, dovrà formare un angolo di riflessione uguale a zero, e, riflettendosi, dovrà ritornare sul proprio cammino.

§ 143. **Dimostrazione sperimentale delle leggi della riflessione.** — Le leggi della riflessione della luce si possono dimostrare sperimentalmente soltanto in modo piuttosto grossolano; ma risultano anche dimostrate indirettamente dai numerosi fenomeni, ai quali dà origine la riflessione della luce.

Un *metodo* scolastico, detto del *Silbermann*, consiste nell'uso di un cerchio verticale graduato (Fig. 135), che ha nel suo centro *C* un piccolo specchio orizzontale *A*. Il raggio che passa per lo zero della graduazione, cioè per *B*, è normale allo specchio. Due regoli, girevoli a cerniera intorno al centro, possono prendere nei due quadranti superiori la posizione dei diversi raggi geometrici; ambedue questi regoli sono prolungati al disopra della graduazione, ma uno di essi alla sua estremità è chiuso da un disco opaco *i*, che ha un piccolo foro nel centro; al disopra vi è fissato uno specchio *m*, il quale può inclinarsi girando intorno ad un asse normale al piano del cerchio graduato e che è destinato a far penetrare un fascetto di luce pel foro del disco, con andamento parallelo al regolo od alidada e tale da colpire lo specchietto *A* nel centro. All'altro regolo poi si fissa una lastrina di vetro smerigliato o un diaframma forato nel centro. L'esperienza consiste nell'osservare che è possibile ricevere nell'occhio, attraverso quest'ultimo diaframma, il raggio riflesso, quando i due regoli od alidade fanno da una parte e dall'altra angoli uguali con la normale, vale a dire quando l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza. La verifica della prima legge risulta dal fatto che il centro dell'apertura del diaframma del secondo regolo si trova, per costruzione, in un piano parallelo al cerchio graduato passante per l'asse della prima alidada.

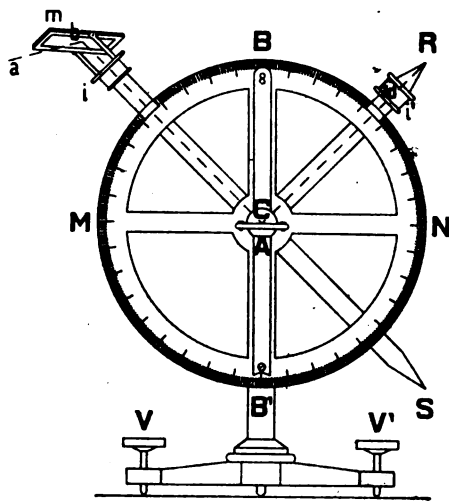



Fig. 135.

§ 144. **Le leggi della riflessione della luce valgono anche per il calor raggiante.** — Lo si dimostra con dispositivo simile a quello indicato nel paragrafo precedente, adattando normalmente

all'asse del primo regolo una sorgente di calor raggiante (cubo di Leslie) e in corrispondenza dell'estremo della seconda alidada una pila termoelettrica, sensibile al calor raggiante stesso. Il cerchio si usa disposto orizzontalmente.

§ 145. **Diffusione.** — Una superficie di un corpo che non sia levigata, ma scabra, si potrà immaginar costituita da una infinità di piccole superfici piane levigate, cosicchè la luce proveniente da un luogo qualunque, da un oggetto qualunque illuminato o luminoso, verrà a riflettersi su tutte quelle piccole superfici in una infinità di direzioni. Si dice che il corpo *diffonde* la luce ricevuta ed il fatto è quello cui si accenna nel § 141 e che riceve il nome di *diffusione*. È in fondo la diffusione, come già dicemmo, che rende illuminato un corpo.

§ 146. **Specchi.** — La superficie ben levigata di un corpo opaco, atta, per quanto abbiamo detto, a riflettere la luce, si dice *speculare*, ed il corpo al quale la superficie stessa appartiene riceve il nome di *specchio*. A seconda della forma geometrica di tale superficie, lo specchio sarà piano o curvo. Se la superficie curva è incavata, lo specchio si dice *concavo*; se è prominente, lo specchio si dice *convesso*. Se l'andamento curvo è quello di una superficie sferica, lo specchio si dice *sferico*; se è quello di una superficie cilindrica, si dice *cilindrico*; se infine è quello di una superficie conica, si dice *conico*, e così via.

§ 147. **Immagine di un corpo luminoso - Specchi piani.** — Abbiamo detto che se un oggetto luminoso si trova di fronte ad un corpo a superficie scabra, illumina questo corpo per il fenomeno della diffusione.

Ma se l'oggetto si pone di fronte ad uno specchio piano, si nota il fatto, sempre singolare ed attraente, per quanto di osservazione comune e quotidiana, del ripetersi, per così dire, dell'oggetto al di dietro dello specchio. Oltre all'oggetto vero e proprio, apparisce al di dietro dello specchio, purchè questo si guardi nella sua parte anteriore, l'oggetto stesso, riprodotto con tutti i suoi particolari di forma e di colore. Si forma, come si suol dire, una *immagine dell'oggetto*.

Com'è facile a comprendersi, si tratta di una illusione pura e semplice; prova ne sia che, guardando la regione di spazio situata al di dietro dello specchio, nulla in essa si trova di ciò che apparisce guardando la parte anteriore dello specchio.

Ma da che cosa dipenderà mai tale illusione? Dal fatto puro e semplice della riflessione della luce, e da una particolarità di comportamento del nostro occhio, che è bene chiarire fin da ora, perchè altri fenomeni dovranno in seguito spiegarsi in base ad essa.

La particolarità è questa: l'occhio attribuisce sempre alla luce che lo penetra la direzione ultima della luce all'ingresso nell'occhio. Per intenderci, supponiamo che, con artifici opportuni, ad un raggio di luce partente dal punto luminoso A si riesca a dare il cammino tortuoso rappresentato dalla Fig. 136, per modo che la direzione del tratto ultimo, che penetra nell'occhio di un osservatore, sia quella che apparisce in prossimità di F. Ebbene, l'occhio vedrà il punto luminoso non in A

(dove effettivamente si trova), ma, in un punto situato sulla direzione che ha la luce in prossimità di F, là dove entra nell'occhio.

Premesso questo, cerchiamo di renderci conto della formazione di immagini per parte di speciali specchi piani, e per semplicità riferiamoci da prima al caso in cui, di fronte allo specchio, si trovi un punto luminoso L. Questo punto luminoso manderà raggi in tutte le direzioni. Fra quelli che investono lo specchio, consideriamone per semplicità due soli, il raggio LM ed il raggio LN, abbastanza vicini l'uno all'altro. Questi raggi si rifletteranno sullo specchio, secondo le note leggi della riflessione, così da generare due raggi riflessi MP ed NQ, che divergeranno l'un dall'altro e andranno a colpire, divergendo, l'occhio dell'osservatore. Questi avrà l'impressione che la luce recata dai raggi MP ed NQ gli provenga in linea retta, secondo le direzioni di questi raggi medesimi e la attribuirà al punto L' di intersezione dei loro prolungamenti.

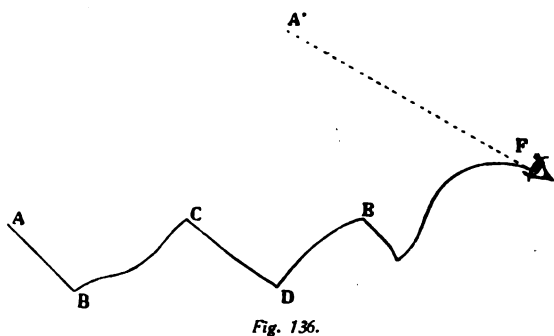



Fig. 136.

Questo effetto che sull'andamento della luce determina non effettivamente ma virtualmente l'occhio, viene in qualche maniera a ripetere al di là dello specchio, simmetricamente a questo, tutto ciò si ha realmente nella irradiazione della luce intorno al punto L. Il che apparisce poi più chiaramente, se si congiunge M con N e si nota che (per l'uguaglianza dei due triangoli LMN ed $L'MN$) risultano uguali i due triangoli LTM ed $L'TM$, ottenuti congiungendo L con L' ed M col punto di intersezione della LL' con la superficie dello specchio. La uguaglianza di questi due triangoli porta difatti a concludere che LTM ed MTL' sono angoli retti, oltre che $LT = L'T$. Quindi:

L'immagine L' di un punto L, data dallo specchio, è simmetrica del punto L rispetto allo specchio; si trova cioè sul prolungamento della perpendicolare abbassata da L allo specchio, ad una distanza da questo uguale a quella che ha il punto luminoso L. Inoltre bisogna insistere su di un altro carattere dell'immagine L', cui già si accennò. Essa rappresenta una vera e propria illusione, in quanto non è affatto formata, là dove appare, da vera e propria luce. Immagini di questo genere son dette *virtuali* per distinguerle da altre, formate da vera e propria luce, quindi dotate di esistenza reale e che perciò si dicono *reali*.

§ 148. **Reciprocità del raggio incidente e del raggio riflesso - Principio della invertibilità del cammino della luce.** — Consideriamo un raggio luminoso LM che si riflette secondo MN. Inversamente, secondo le leggi della riflessione, un raggio luminoso NM si rifletterà in ML: è ciò che si esprime dicendo che vi ha reciprocità nel cammino dei raggi luminosi, per il caso della riflessione.

Ciò che avviene per la riflessione avviene anche per la rifrazione, come vedremo, tanto che è lecito generalizzare e dire che *vi è inver-*

tibilità nel cammino della luce. Questa asserzione va intesa nel senso che: se un raggio di luce diretto (Fig. 136), a partire da un punto A, secondo AB, raggiunge, dopo vari fatti di riflessione e di rifrazione che lo obbligano a seguire il cammino $ABCDEF$, il punto F secondo la direzione finale $A'F$; diretto che fosse da F secondo FA', per modo da dover subire in senso inverso tutti i fenomeni considerati da A ad F, raggiungerebbe A secondo BA, dopo aver percorso il cammino $FEDCBA$.

Fig. 137.

§ 149. Riflessione di un fascio convergente di raggi luminosi - Immagine di un punto luminoso virtuale. — Supponiamo (Fig. 140) che si facciano cadere su di uno spec-

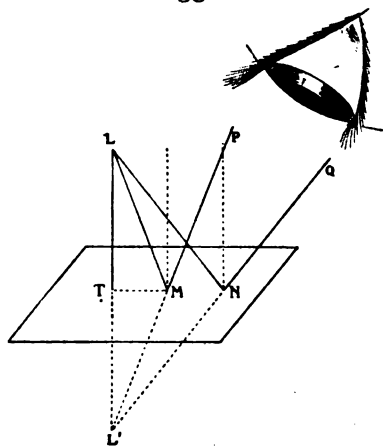
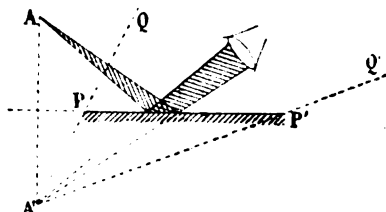



Fig. 138. - Anche se il punto luminoso A non è direttamente contro allo specchio, lo si vede per riflessione.

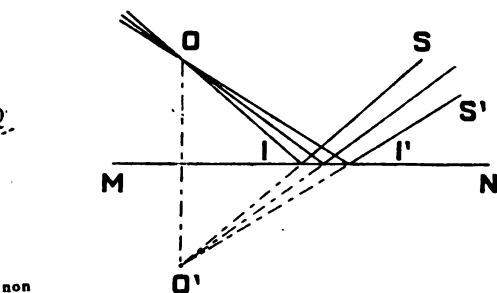
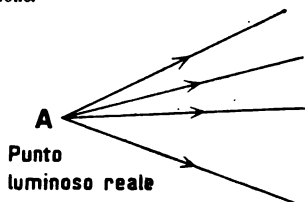



Fig. 139.

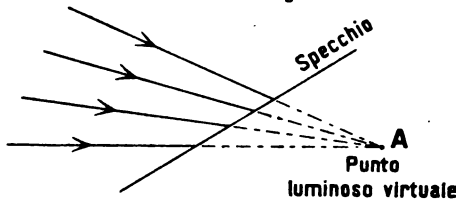



Fig. 140.

chio piano MN dei raggi luminosi SI, $S'I'$..., che andrebbero a convergere in O', se lo specchio

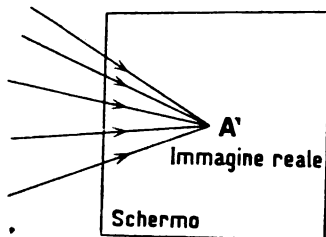



Fig. 141.

non esistesse: si dice che si ha in O' un *punto luminoso virtuale*. In base alla reciprocità indicata

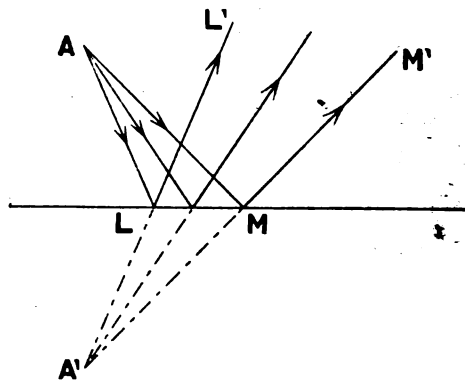



Fig. 142. - A' è immagine virtuale di A.

nel paragrafo precedente, i raggi riflessi anderanno ad incontrarsi in un punto O, simmetrico di O' rispetto allo specchio e vi formeranno un vero punto luminoso, che sarà l'immagine del punto luminoso virtuale O', mentre O sarà immagine reale, perchè costituita da vera e propria luce.

Potremo dunque dire: *per riflessione su di uno specchio piano, un punto luminoso virtuale dà come immagine un punto luminoso reale, posto simmetricamente rispetto allo specchio.*

L'occhio percepisce tale immagine reale solo se vien posto nel cono, formato dai raggi riflessi, ma la si può rendere visibile da ogni punto dell'ambiente ove si opera, ricevendola su di uno schermo bianco.

§ 150. **Riassunto delle nozioni relative ai punti e alle immagini reali e virtuali.** — Non è solo cogli specchi che si possono ottenere punti luminosi virtuali e immagini reali e immagini virtuali; ma con altri mezzi, dei quali dovremo occuparci in seguito. Ora ci conviene fissare la nozione di tali elementi (Fig. 140 a 142).

Un punto luminoso è sempre o *sorgente* (oggetto luminoso) o *immagine reale.* Rispettivamente è origine di raggi luminosi divergenti, ovvero effettivo incontro di raggi convergenti, risultanti da una conveniente azione operata su di un fascio luminoso da un opportuno apparecchio ottico (specchio od altro).

Si chiama *punto luminoso virtuale* un punto geometrico nel quale concorrerebbero raggi luminosi (costituenti quindi un fascio luminoso convergente) se il loro cammino non fosse intercettato da un conveniente apparecchio (specchio od altro).

Immagine puntiforme virtuale è un punto geometrico, dal quale sembrano emanare raggi luminosi divergenti (costituenti quindi un fascio luminoso divergente), provenienti invece (per opportuna trasformazione di un altro fascio luminoso, originato da un effettivo punto al quale corrisponde l'immagine) da un conveniente apparecchio (specchio od altro). In essa all'occhio dell'osservatore, che riceve i raggi divergenti, apparisce un punto luminoso che, non avendo esistenza reale, vien detto virtuale.

§ 151. **Immagine di oggetti luminosi.** — Fissata la formazione della immagine di un *punto* luminoso per parte dello specchio piano, si intende facilmente la formazione dell'immagine d'un *oggetto* luminoso. Basta pensare che esso può considerarsi come costituito dall'insieme di infiniti punti luminosi e che la sua immagine sarà l'insieme delle immagini di tali punti (Fig. 143). Volendo costruirne l'immagine, la si dovrà dunque costruire per punti. Si costruiranno quindi le immagini dei punti più salienti dell'oggetto luminoso, per poi riunirle con tratto continuo. A tale fine occorre abbassare sul piano dello specchio le perpendicolari dai vari punti luminosi e prolungarle tanto quant'è la distanza dallo specchio del punto cui ciascuna si riferisce.

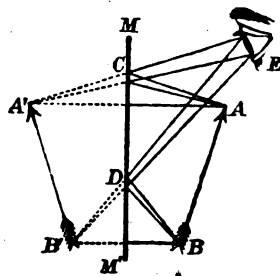



Fig. 143. - Come si vede l'immagine di un oggetto luminoso.

Per il caso di una linea luminosa AB, situata sul piano del foglio, basta costruire le immagini dei punti estremi A e B e congiungerle poi con un segmento di retta.

L'immagine è *diritta, virtuale* e di grandezza uguale a quella del corpo luminoso. Va anche notato come essa sia *simmetrica* rispetto allo specchio (Fig. 144), cioè tale da non potersi in alcun modo sovrapporre all'oggetto luminoso (Fig. 144). A un uomo posto dinanzi ad uno specchio piano, appare a prima vista la propria immagine come perfettamente identica a sè stesso, ma non è così, e per persuadersene basta che si ponga un fiore all'occhiello o si metta una mano in tasca. È anche opportuno avvertire che le immagini date dagli ordinari specchi di vetro, argentati sulla faccia posteriore, non sono mai nette, perchè in realtà non si tratta di un solo specchio, ma di due superfici riflettenti, una delle quali, oltre a riflettere verso l'esterno, riflette verso l'interno. Ogni raggio di luce, partente da un punto luminoso S, subisce le riflessioni multiple che mostra la Fig. 145, per cui il punto S, nella riflessione apparisce multiplo. Anche l'immagine di un oggetto apparisce multipla. La multiplicità in certe condizioni si traduce in confusione di contorni dell'immagine principale. (Vedi anche Fig. 146).

Fig. 144. - L'immagine è simmetrica, non sovrapponibile.

Gli specchi piani si utilizzano variamente. Può uno specchio piano, come quello del sistema rappresentato dalla Fig. 147, mobile intorno all'asse b e ad uno perpendicolare a questo, passante per s, servire a dirigere attraverso ad un'apertura, praticata nello scuro d'una finestra, contro cui si adatti la parte cilindrica del sistema, i raggi del Sole. Facile è intendere dalla Fig. 148 come la riflessione su di una lastra di vetro posta nella parte anteriore di un palcoscenico poco illuminato serva a produrre la illusione di *spettri*.

§ 152. **Campo di uno specchio per una posizione determinata dell'occhio.** — Si chiama così la porzione dello spazio, nella quale gli oggetti saranno, per riflessione, visibili all'occhio che abbia quella posizione determinata. È l'angolo solido sotto il quale si vede lo specchio dal punto simmetrico dell'occhio. L'angolo solido $QA'Q'$ sotto cui si vede lo specchio dal simmetrico A' di un punto luminoso A (Fig. 138) limita invece la regione di visibilità dell'immagine del punto A.

Spostamento dell'immagine negli specchi piani. — È facile dimostrare che:

1. Se uno specchio si sposta parallelamente a sè stesso di un tratto d, l'immagine che esso dà di un oggetto, subisce uno spostamento doppio $2d$.

2. Se uno specchio ruota di un angolo Θ, attorno ad un asse preso nel proprio piano, l'immagine di un punto luminoso da esso fornita ruota attorno a questo medesimo asse d'un angolo doppio.

3. Se un raggio incidente di direzione invariabile incontra uno specchio e se lo specchio ruota di un angolo Θ attorno ad una perpendicolore al piano di incidenza, il raggio riflesso ruota di un angolo doppio.

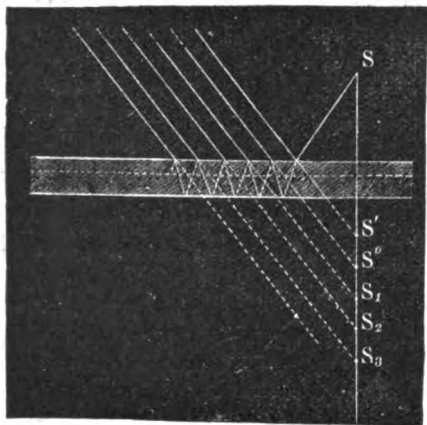



Fig. 145.

Fig. 147.

Fig. 146. - **Immagini multiple per le riflessioni sulle due facce della grossa lastra formante lo specchio.**

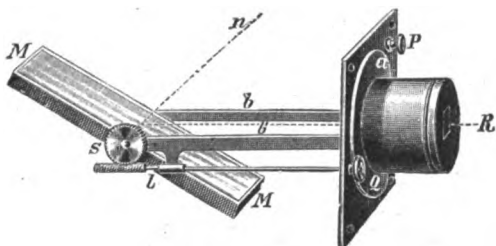
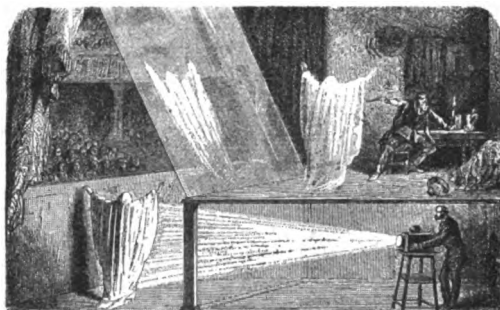



Fig. 148.

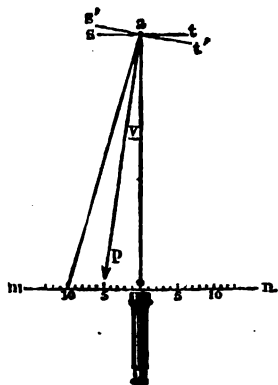



Fig. 149. - **Un raggio riflesso in *a* dallo specchio *st* e diretto come mostra la figura verso il cannocchiale, ruota di un angolo $2v$ se lo specchio *st* portandosi in *s't'* ruota di un angolo *v*.**

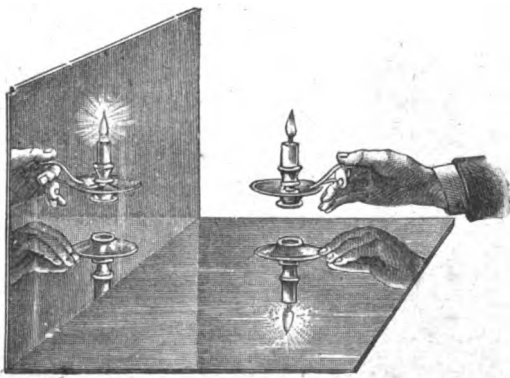



Fig. 150.

Specchi ad angolo. — Due specchi piani inclinati l'uno verso l'altro danno di un oggetto situato fra di essi parecchie immagini, dovute alle ripetute successive riflessioni dei vari raggi luminosi sui due specchi. Il numero delle immagini aumenta a misura che l'angolo formato fra questi diminuisce; ed il luogo geometrico di tali immagini è una circonferenza avente il centro sullo spigolo dell'angolo formato dai due specchi, e per raggio la distanza dell'oggetto da tale spigolo. Il numero delle immagini, contando anche l'oggetto, è uguale al quoziente ottenuto dividendo il valore della circonferenza, ossia 360°, per quello dell'angolo degli specchi. Si dimostra che quando l'angolo α degli specchi è contenuto un numero intero n di volte in 360°, un oggetto luminoso dà $n+1$ immagini contando anche l'oggetto; ad eccezione di quando n è pari, e quando, n essendo dispari, l'oggetto è ad uguale distanza dagli specchi. Allora, coincidendo due immagini, le immagini sono n.

Quando α è contenuto n volte in 360° con un resto β, per ogni oggetto situato ad una distanza da ogni specchio più grande di $\frac{\beta}{2}$ allorchè n è pari, e più piccola allorchè n è dispari, vi sono $n+1$ immagini contando anche l'oggetto; e ve ne sono $n+2$ quando l'oggetto è ad una distanza più piccola o più grande di $\frac{\beta}{2}$ a seconda che n è pari o dispari. Se i due specchi sono paralleli l'uno all'altro, vale a dire formano fra loro un angolo uguale a zero, il numero delle immagini è infinito e sono tutte in linea retta.

Queste proprietà degli specchi piani ad angolo sono utilizzate in quel notissimo giocattolo che è il *caleidoscopio.*

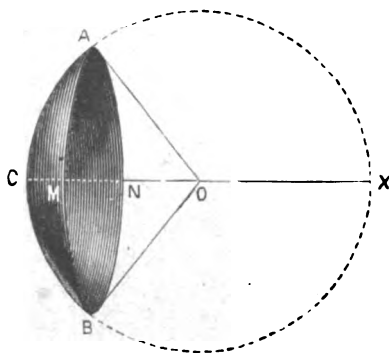
CAPITOLO XV.

GLI SPECCHI CURVI.

§ 153. **Generalità sugli specchi sferici.** — Già avvertimmo che gli specchi possono avere un andamento curvo, invece che piano e andamento curvo il più svariato. Per attenerci alle forme più semplici, possiamo dire che gli specchi curvi possono essere sferici, parabolici, cilindrici, conici ecc.

Fig. 151.

Saranno *concavi* se hanno speculare la faccia ad andamento incavato, *convessi* invece se hanno speculare la faccia ad andamento prominente.

Anche gli specchi curvi danno immagini, ma esse sono generalmente deformate. Se ci fermiamo al caso degli specchi sferici, possiamo dire che la deformazione delle immagini è ridotta al minimo, qualora essi non abbiano curvatura molto pronunciata, il che equivale a dire, che abbiano piccola *apertura,* intendendosi per apertura l'angolo solido *AOB* (Fig. 151).

Si considereranno praticamente di piccola apertura se tale angolo è minore di 4°. Nello studio che noi faremo degli specchi sferici ammetteremo le condizioni seguenti, alle quali necessariamente saranno legati i risultati delle nostre considerazioni:

1. Lo specchio presenta un angolo di apertura α piccolissimo (circa 4°), la qual cosa equivale a non considerare che una porzione ristrettissima della sfera riflettente.

2. I raggi luminosi che colpiscono lo specchio sono pochissimo inclinati sul raggio della sfera che va al punto di incidenza.

La riflessione della luce sugli specchi sferici segue le stesse leggi relative agli specchi piani. Per avere, in corrispondenza di un qualsiasi raggio incidente, il relativo raggio riflesso si dovranno applicare le note leggi della riflessione, tenendo presente che la normale condotta dal punto di incidenza è sempre il raggio della sfera (alla quale appartiene lo specchio) passante per quel punto (Fig. 152 e 153). È facile intuire che, in causa della curvatura dello specchio, un fascio parallelo incidente darà, riflettendosi, un fascio convergente se lo specchio è concavo, ed un fascio divergente se lo specchio è convesso.

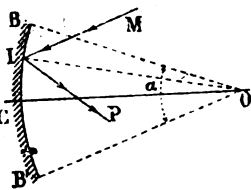
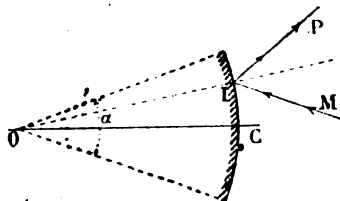



Fig. 152. *Fig. 153.*

Come si riflette un raggio luminoso che cada sulle superficie di uno specchio concavo o convesso.

§ 154. **Centro di figura, centro di curvatura, asse principale, asse secondario.** — Rappresentiamoci in sezione (Fig. 154 *a*) col piano del foglio uno specchio concavo. Essendo questo una calotta sferica, presentante in prospettiva l'aspetto della parte sinistra della Fig. 151, la sezione sarà un arco di cerchio *AB*, il cui punto medio *C* sarà il centro della calotta, ed appartenente ad un cerchio di centro *O*. Il punto *C* si dice *centro di figura* dello specchio concavo ed il punto *O* *centro di curvatura*. Per il caso dello specchio (Fig. 154 *b*) convesso, la sezione rappresentatrice sarà ancora un arco di cerchio, pel quale potremo considerare il centro di figura *C* ed il centro di curvatura *O*. Qui il centro di curvatura non si trova nella regione dello spazio situata davanti allo specchio, come nel caso dello specchio concavo; ma nella regione opposta.

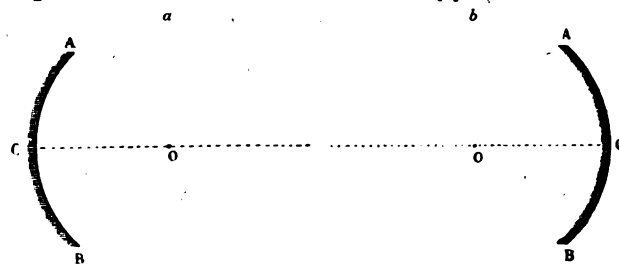



Fig. 154.

La retta indefinita, individuata dai punti *O* e *C*, si chiama *asse principale*, tanto per lo specchio concavo come per lo specchio convesso. Una retta indefinita che, partendo da un punto dello specchio,

vada a passare per il centro di curvatura si dice *asse secondario.* In uno specchio esistono evidentemente infiniti assi secondari.

§ 155. **Fuoco principale.** — Orbene, se il fascio di raggi luminosi è parallelo all'asse principale, il fascio convergente dei corrispondenti raggi riflessi (per il caso dello specchio concavo di piccola apertura) va a passare (Fig. 155) per il punto medio F del tratto OC; ed il fascio divergente (Fig. 156) di raggi riflessi (per il caso dello specchio convesso) ha tale andamento che i raggi stessi, prolungati idealmente al di dietro dello specchio, sembrano raggiungere il punto medio del tratto OC.

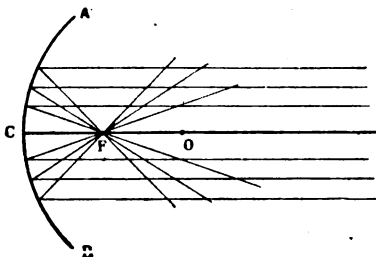
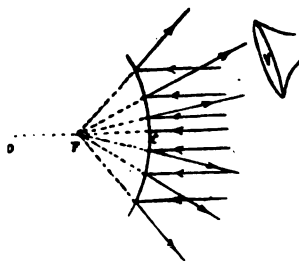



Fig. 155. *Fig. 156.*

Se si tratta di specchio concavo il punto F è raggiunto da veri e propri raggi di luce, è cioè un punto luminoso reale, e siccome alla luce è associato calore, è anche punto di concentrazione di calore. Si chiama perciò *fuoco principale* dello specchio, e, si può aggiungere, è *fuoco reale.*

Se si tratta di specchio convesso di piccole aperture il punto F non riceve i raggi luminosi effettivi; la riflessione sullo specchio avviene in modo che i raggi riflessi sembrano partire da quel punto, hanno cioè lo stesso andamento che avrebbero se partissero da quel punto, dal quale in realtà non partono. Quel punto tuttavia può servire ad individuare l'andamento dei raggi riflessi. Si chiama esso pure fuoco principale dello specchio convesso. Non è un punto luminoso reale; si dice perciò *virtuale.* Apparisce all'occhio V di un osservatore che riceva i raggi riflessi. In base al fatto che per la riflessione della luce sulle superfici curve si applicano le stesse leggi della riflessione sulle superfici piane, un raggio di luce diretto verso il centro di curvatura di uno specchio sferico ha l'andamento di un raggio della sfera cui appartiene lo specchio, è quindi normale allo specchio e si riflette perciò ritornando sopra se stesso.

Fig. 157. - I raggi mandati allo specchio da un punto luminoso situato nel fuoco principale, raggiunto lo specchio assumono poi andamento parallelo all'asse principale.

§ 156. **Immagine di un punto - Sistemi stigmatici, aplanetici, rettilineari.** — Quando ai raggi partenti da un punto (omocentrici) corrisponde un fascio di raggi riflessi dallo specchio, convergenti in un punto, o divergenti da un punto (cioè omocentrici), questo punto si chiama (come per gli specchi piani) *immagine* o *punto coniugato* del punto luminoso. Lo specchio si dice *stigmatico* per i due punti, e se per uno specchio, o, in generale, per uno strumento ottico, la indicata corrispondenza avvenisse per ogni punto luminoso, lo specchio o

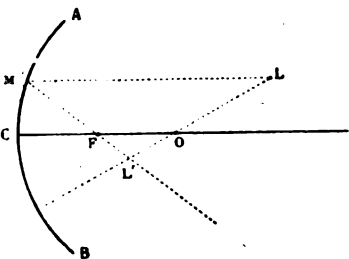
lo strumento ottico, si direbbe *stigmatico*. Gli specchi piani sono stigmatici. Gli specchi sferici sono rigorosamente stigmatici solo per un punto, il centro di curvatura; si possono però ritenere sensibilmente stigmatici per tutti i punti qualora soddisfino alle condizioni del § 153.

Quando ai punti di un piano luminoso perpendicolare all'asse corrispondono come immagini punti situati in un piano pure perpendicolare all'asse, lo strumento ottico si dice *aplanetico*. Quando il sistema non è aplanetico, l'immagine del piano è una superficie curva, e si dice che si ha *curvatura del campo*. Se ai punti di una retta corrispondono come immagine i punti di una retta, il sistema ottico si dice *rettilineare*. Se questo non avviene, si dice che vi ha *distorsione*.

A rigore, un sistema ottico deve essere stigmatico, aplanetico e rettilineare per la regione dello spazio che deve esplorare.

§ 157. **Costruzione della immagine di un punto.** — Basterà, per quello che si è detto nel precedente paragrafo, seguire due raggi partenti dal punto luminoso nel loro processo di riflessione, per avere, là dove s'incontrano i due raggi riflessi, l'immagine del punto luminoso.

Fig. 158.

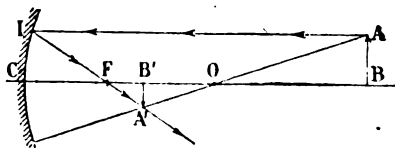
Siccome sappiamo ben seguire il raggio parallelo all'asse principale (perchè dopo la riflessione va a passare pel fuoco) e quello diretto verso il centro di curvatura (perchè ritorna su sè stesso), è quindi facilissimo costruire l'immagine (Fig. 158) di un punto luminoso qualsiasi. Da questo punto L si conduce la retta LM, parallela all'asse principale e poi la MF. Si congiunge quindi, fino ad incontrare lo specchio, il punto L col punto O. In L', là dove la LO incontra la MF, si ha l'immagine di L.

§ 158. **Costruzione delle immagini di oggetti luminosi date da uno specchio concavo per le varie posizioni degli oggetti dinanzi ad esso.** — L'immagine di un oggetto luminoso qualsiasi si avrà riunendo con tratto continuo le immagini dei punti salienti del contorno dell'oggetto luminoso.

Costruendo così graficamente per vari casi le immagini, si trova a riguardo degli specchi concavi, quanto segue:

Un oggetto luminoso situato al di là del centro di curvatura dello specchio ha la sua immagine, reale, capovolta e più piccola dell'oggetto fra il fuoco ed il centro di curvatura; tanto più piccola e tanto più vicina al fuoco, quanto più l'oggetto è lontano dal centro di curvatura (Fig. 159).

Fig. 159.

Se l'oggetto luminoso passa per il centro di curvatura, anche l'immagine, reale, è capovolta, passa per il centro di curvatura ed ha le stesse dimensioni dell'oggetto.

Se l'oggetto luminoso è fra il centro di curvatura ed il fuoco, l'immagine è al di là del centro di curvatura. È reale, capovolta, più

grande dell'oggetto, tanto più grande e lontana dal centro di curvatura, quanto più l'oggetto è vicino al fuoco (Fig. 162).

Se l'oggetto luminoso passa per il fuoco, l'immagine va all'infinito (Fig. 161), e se è fra il fuoco e lo specchio, l'immagine è virtuale, apparisce cioè al di dietro dello specchio, è diritta e più grande dell'oggetto, e tanto più grande e lontana dallo specchio, quanto più l'oggetto è vicino al fuoco (Fig. 163, 165 e 166). Se si tratta di un oggetto virtuale, situato quindi al di dietro dello specchio, si forma un'immagine reale, diritta e più piccola dell'oggetto, fra lo specchio ed il fuoco.

Per riassumere ciò che concerne la formazione delle immagini per

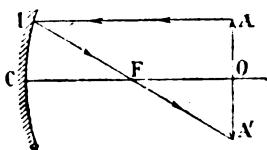



Fig. 160. - L'oggetto *AO* passa per il centro di curvatura.

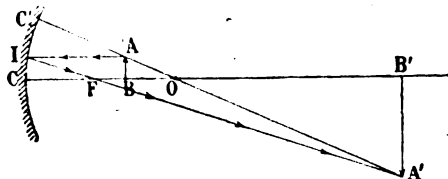



Fig. 162.

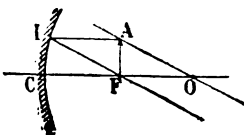



Fig. 161.

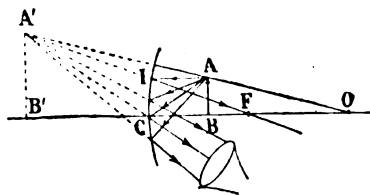



Fig. 163.

parte dello specchio concavo, si può dividere lo spazio che gli sta davanti e nella parte posteriore in quattro regioni, mediante piani passanti per punti situati sull'asse principale; la prima si estende dall'infinito positivo (alla destra di chi legge) al piano passante per il centro di curvatura; la seconda da questo piano a quello passante per il fuoco (piano focale); la terza dal piano focale allo specchio (o al piano passante pel centro di figura) e la quarta dallo specchio all'infinito negativo (alla sinistra di chi legge).

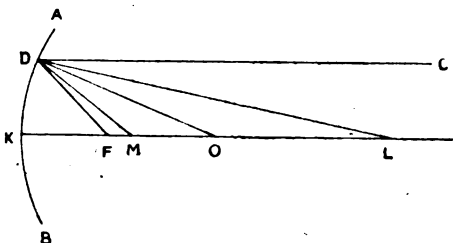
Se il punto luminoso è posto nella prima regione, la sua immagine viene a trovarsi nella seconda, e reciprocamente se il punto luminoso è nella seconda la sua immagine è nella prima. Così se il punto luminoso è nella terza regione, la sua immagine è nella quarta e viceversa. In quest'ultimo caso conviene osservare che se il punto passa nella quarta regione, dev'essere punto luminoso virtuale, quale verrebbe a formarsi per incontro di raggi luminosi convergenti, se questi non trovassero ostacolo nella opacità del materiale costituente lo specchio.

Poichè ciò che si dice per i punti luminosi può estendersi al caso degli oggetti, potremo formare questo prospetto:

Regione	Oggetto	Immagine
I.	Nella 1ª regione e reale	Nella 2ª reale, capovolta e più piccola
II.	» 2ª » e »	» 1ª » » e » grande
III.	» 3ª » e »	» 4ª virtuale, diritta e » »
IV.	» 4ª » e virtuale	» 3ª reale, » e » piccola

§ 159. **Teoria elementare dello specchio concavo.** — Un raggio di luce LD, procedente da un punto dell'asse principale (Fig. 164) viene riflesso dallo specchio in DM, ed incontra l'asse in un punto M, compreso tra il centro O di curvatura ed il fuoco principale F. Invero l'angolo d'incidenza LDO è minore dell'angolo d'incidenza CDO di un raggio CD parallelo all'asse; dunque sarà l'angolo $ODM < ODF$, e perciò M cadrà tra O ed F. Se lo specchio è di piccola apertura, tutti i raggi LD,

Fig. 164.

LE ecc., procedenti da un punto L'' dell'asse, e divergenti verso lo specchio, vengono da questo riflessi e concentrati assai prossimamente in un medesimo punto M che è l'immagine di L, o, come suol dirsi, il *fuoco coniugato* di L. È facile capirlo col ragionamento seguente:

Chiameremo r il raggio di curvatura OK dello specchio AB, p' e p le distanze KM, KL de' fuochi coniugati M ed L dal centro K dello specchio. Nel triangolo DML la retta DO è bisettrice dell'angolo D; perciò avremo

$$DM : DL = OM : OL.$$

Ma se lo specchio è di piccola apertura sarà sensibilmente $DM = KM = p'$; $DL = KL = p$; $OM = OK - KM = r - p'$; $OL = KL - KO = p - r$. Sostituendo nella proporzione precedente questi valori, si ha

$$p' : p = (r - p') : (p - r)$$

ossia

$$p'r + pr = 2pp';$$

dividendo i due membri dell'uguaglianza per $pp'r$ si ottiene

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}, \qquad (35)$$

formola la cui discussione conduce alla cognizione dell'intera teoria degli specchi sferici. Si chiama *formola generale degli specchi concavi* e, in quanto è stata dedotta scegliendo ad arbitrio il raggio luminoso LD, vale per tutti i raggi partenti da L, qualora l'apertura dello specchio sia piccola. Essi daranno tutti origine a raggi riflessi, che incontreranno l'asse ad una medesima distanza dallo specchio, cioè si incontreranno gli uni con gli altri in un medesimo punto.

Se p ha un valore infinito, $\frac{1}{p}$ risulterà nullo e la formola più sopra scritta diverrà

$$\frac{1}{p'} = \frac{2}{r},$$

la quale ci dice che il fuoco principale ha una distanza p' dallo specchio uguale ad $\frac{r}{2}$.

Indicando con f tale distanza, detta *distanza focale*, la formola generale può scriversi:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}. \qquad (36)$$

La discussione della formola, così ottenuta, che scriveremo, per comodità, così:

$$p' = \frac{pf}{p-f} = \frac{f}{1-\frac{f}{p}},$$

fornisce le posizioni relative del punto luminoso e della sua immagine, quando si supponga che il primo si sposti dall'infinito fino alla superficie dello specchio. Discutendola, si avrà il seguente prospetto:

Quando	$p = \infty$	è $p' = f$	;
»	p decresce	p' aumenta	;
»	$p = 2f$	è $p' = 2f$	;
»	$f < p < 2f$	» $p' > 2f$	;
»	$p = f$	» $p' = \infty$	;
»	$p < f$	» $p' < o$	;
»	$p = o$	» $p' = o$	;
»	$p = -f$	» $p' = \frac{f}{2}$	;
»	$p = -\infty$	» $p' = f$	.

Riassumendo, quando il punto luminoso percorre tutto l'asse da $+\infty$ a $-\infty$, il fuoco coniugato parte dal fuoco principale, va verso il centro, arriva a $+\infty$, poi passa bruscamente a $-\infty$ e ritorna verso lo specchio per raggiungerne il vertice e finalmente *F*. In altri termini il punto luminoso e la sua immagine camminano sempre in senso inverso e si incontrano due volte, al centro di curvatura e al centro di figura.

§ 160. **Costruzione delle immagini di un oggetto luminoso, date da specchi sferici convessi, in corrispondenza di varie posizioni di fronte a questi dell'oggetto.** — La costruzione delle immagini date dagli specchi convessi, effettuate con la stessa regola usata per gli specchi concavi, conduce a stabilire come essi portino a risultati, che si possono desumere dai risultati ottenuti per gli specchi concavi, invertendo fra loro le parole *virtuale* e *reale* e numerando le quattro regioni, a partire da quella anteriore allo specchio. In ogni caso, a meno di uno che considereremo più sotto, danno immagini virtuali, diritte e più piccole degli oggetti luminosi; tanto più piccole quanto più gli oggetti sono lontani dallo specchio. La massima distanza al di dietro dello specchio, in cui appariscono le immagini, è la distanza focale principale.

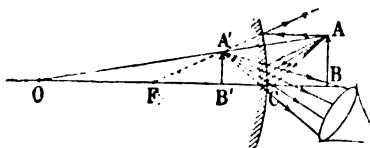



Fig. 165.

Il solo caso nel quale si ottengono immagini reali (corrispondenti alla formazione di immagini virtuali negli specchi concavi) si ottiene ponendo l'oggetto fra il fuoco e la superficie dello specchio: l'oggetto dovrà necessariamente essere virtuale. Riassumendo, si possono considerare anche per gli specchi convessi 4 regioni: la 1ª va dall'infinito a destra a *C*, la 2ª da *C* al fuoco, la 3ª dal fuoco ad *O*, e la 4ª da *O* all'infinito a sinistra.

Considerando un punto luminoso *P* sull'asse si può dire: Se *P* è reale, cioè appartiene alla 1ª regione, l'immagine si trova nella 2ª ed

è virtuale, se P è nella 2ª dovrà essere virtuale e la sua immagine sarà nella 1ª e reale. Se P è nella 3ª sarà virtuale e l'immagine che verrà nella 4ª sarà pure virtuale e finalmente se P è nella 4ª l'immagine sarà nella terza pure virtuale. Cioè tutto quanto si è detto per gli specchi concavi risulta invertito.

§ 161. **Teoria elementare degli specchi sferici convessi.** — Per uno specchio convesso si trova quale formola generale (e ciò con ragionamento simile a quello fatto per gli specchi concavi):

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{2}{r},$$

ovvero

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}. \qquad (37)$$

Quest'ultima può mettersi sotto la forma

$$p' = \frac{pf}{p+f} = \frac{f}{1+\frac{f}{p}};$$

dalla quale risulta che per $p = \infty$, $p' = f$; per $p = f$, $p' = \frac{f}{2}$; per $p = o$, $p' = o$; e che, per p negativo (punto luminoso virtuale), se p varia da o a $-f$, p varia da o ad ∞ e l'immagine corrispondente è reale e se p varia da $-f$ a $-\infty$, p' varia da ∞ ad f, l'immagine corrispondente essendo virtuale.

§ 162. **Dimostrazione sperimentale delle proprietà degli specchi concavi e convessi.** — Tutto quello che si è detto circa la formazione delle immagini per parte degli specchi sferici concavi e convessi, può verificarsi sperimentalmente, prendendo un oggetto luminoso qualsiasi (candela accesa o altro), raccogliendo le immagini reali (che sono nell'aria davanti allo specchio) sopra un diaframma ed osservando direttamente quelle virtuali, situate al di là dello specchio. Avvicinando od allontanando lo specchio dall'oggetto, oppure avvicinando od allontanando l'oggetto dallo specchio, si realizzano tutti i casi possibili, tanto per gli specchi concavi che pei convessi.

Per realizzare il caso di un oggetto virtuale si ricorre ad una lente (di cui vedremo in seguito le proprietà), la quale, posta sul cammino della luce, tende a formare un'immagine dell'oggetto luminoso su di un diaframma, e si colloca uno specchio concavo fra la lente e il diaframma, per modo che questa immagine non possa formarsi. Essa stessa, nella sua non esistenza, si considera, per l'esistere effettivo di raggi luminosi che la formerebbero se non ci fosse l'ostacolo dello specchio, viene a costituire l'oggetto virtuale, situato nella regione posteriore dello specchio.

Pel caso dello specchio concavo si avrà quindi un'immagine che si troverà davanti allo specchio nella 3ª regione, che sarà reale e quindi si potrà raccogliere sopra uno schermo.

Osservazione. D'ordinario noi siamo abituati a vedere cogli specchi le immagini virtuali, non le reali, per cui quando abbiamo davanti uno specchio che dà luogo ad un'immagine reale, la quale si formi davanti ad esso, in direzione fra noi e lo specchio, la crediamo virtuale,

e ci sembra di vederla entro lo specchio. Per vedere che in realtà questa immagine è sospesa nell'aria bisogna usare qualche artifizio, ad esempio, nascondere il contorno dello specchio collocando quest'ultimo, al di là di un diaframma con una conveniente apertura. In tal caso, calcolate bene le distanze e guardando attraverso l'apertura da una posizione opportuna, si vede la propria immagine sospesa in corrispondenza dell'apertura. Si può fare anche un'altra esperienza. Ponendo un candeliere vuoto davanti ad uno specchio concavo, ed una candela in una data posizione, tale che la sua immagine prodotta dallo specchio vada a formarsi al di sopra del candeliere, da un punto O, situato davanti allo specchio, sembrerà di vedere la candela posta sul candeliere, contrariamente alla realtà.

§ 163. **Ingrandimento negli specchi sferici.** — Si dice ingrandimento (G) il rapporto tra la grandezza lineare I dell'immagine e la grandezza O dell'oggetto:

$$G = \frac{I}{O}.$$

Si dimostra facilmente con considerazioni geometriche che è: $G = \frac{p' - f}{f} = \frac{f}{p - f} = \frac{p'}{p}$ per gli specchi concavi e $G = \frac{f - p'}{f} = \frac{f}{p + f} = \frac{p'}{p}$ per gli specchi convessi. Per gli uni e per gli altri:

$$G = \frac{I}{O} = \frac{p'}{p}, \qquad (38)$$

cioè *l'ingrandimento è dato dal rapporto fra le distanze dallo specchio dell'immagine e dell'oggetto.*

Fig. 166. - Imagine virtuale data da uno specchio concavo.

§ 164. **Aberrazioni degli specchi sferici.** — Quando le condizioni che abbiamo ammesse per la teoria elementare degli specchi sferici e per le altre considerazioni intorno ad essi che sin qui abbiamo fatte, non siano realizzate in modo soddisfacente, le immagini ottenute mancano di nettezza e sono deformate, perchè si producono dei fenomeni detti di *aberrazione.*

I raggi partenti da un punto non concorrono più in un punto esattamente, e così i raggi paralleli all'asse principale invece che convergere in un unico punto (il fuoco) si intersecano variamente dando origine ad una superficie luminosa, detta *catacaustica* o *caustica per riflessione.*

Si possono costruire specchi

esenti da aberrazioni, ma in relazione soltanto a determinate condizioni di incidenza. Uno specchio esente da aberrazioni per certe condizioni di incidenza, non lo sarà più per certe altre e viceversa.

§ 165. **Specchi parabolici.** — Se si vuole che un fascio di luce parallela, proveniente da una certa direzione verso uno specchio di grande apertura, converga dopo riflessione in un punto unico, basterà far uso di uno specchio parabolico con l'asse principale in quella direzione. Si tratta di uno specchio, la cui superficie riflettente è un paraboloide di rivoluzione, vale a dire può immaginarsi descritta da una parabola [1] che ruoti intorno al proprio asse. Fuoco ed asse di questa diventano fuoco ed asse principale dello specchio. In conseguenza della proprietà della parabola di avere la tangente in un punto qualsiasi ugualmente inclinata sul raggio vettore e sulla parallela all'asse per quel punto, un fascio luminoso parallelo all'asse dello specchio parabolico converge, dopo la riflessione, esattamente sul fuoco. Uno specchio parabolico è, difatti, rigorosamente stigmatico per due punti: il punto all'infinito sull'asse principale ed il fuoco.

§ 166. **Specchi conici e cilindrici.** — Gli specchi conici e quelli cilindrici danno immagini marcatamente deformate.

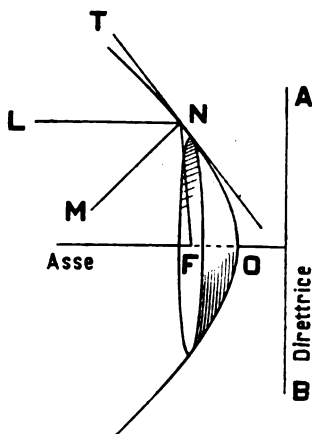



Fig. 167.

Fig. 168.

Se uno specchio conico viene posto con la propria base nella regione centrale di un disco, lungo la cui periferia sia opportunamente disegnata una figura apparentemente irregolare, lo specchio conico la deforma al punto da far apparire in esso, riguardandolo nella direzione dell'asse, una figura regolare.

Uno specchio cilindrico poggiato nella regione mediana di un disco come quello della Fig. 168, contenente un disegno apparentemente insignificante, ma eseguito in modo opportuno, dà immagini perfettamente regolari.

[1] La *parabola* è una curva piana, luogo dei punti equidistanti da un punto fisso *F* (*fuoco*) e da una retta *AB* (*direttrice*). La perpendicolare abbassata dal fuoco sulla direttrice è l'*asse*. Esso incontra la parabola in un punto detto *vertice*. Ogni retta che congiunga il fuoco ad un punto qualsiasi *N* della curva è un *raggio vettore*.

Il paraboloide di rivoluzione e la sfera sono due superfici ben differenti, tuttavia in prossimità del vertice, paraboloide e sfera tangente internamente (con raggio uguale al doppio della distanza focale dal paraboloide) differiscono assai poco.

CAPITOLO XVI.

LA RIFRAZIONE DELLA LUCE E LA RIFLESSIONE TOTALE.

§ 167. **La rifrazione della luce.** — Se un raggio di luce o un fascio di raggi paralleli raggiunge la superficie di un corpo trasparente, accade che, nell'atto stesso di attraversare questa superficie, devia dalla propria direzione. La cosa si vede assai bene se in un ambiente buio si invia obliquamente un fascio di raggi paralleli sulla superficie d'una massa d'acqua, contenuta in un recipiente di vetro: il fascio che penetra nell'acqua non giace sul prolungamento del fascio incidente. Nello stesso tempo, come facemmo già notare (§ 141), una porzione della luce incidente viene riflessa.

In ogni caso, quando un fascio di raggi paralleli cade obliquamente

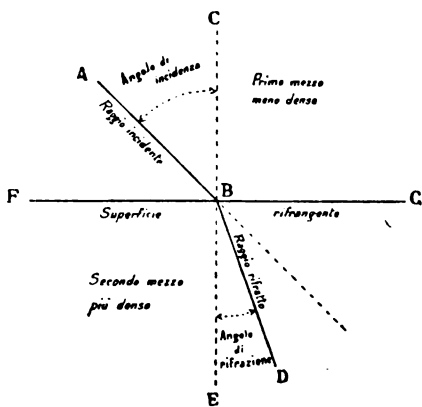
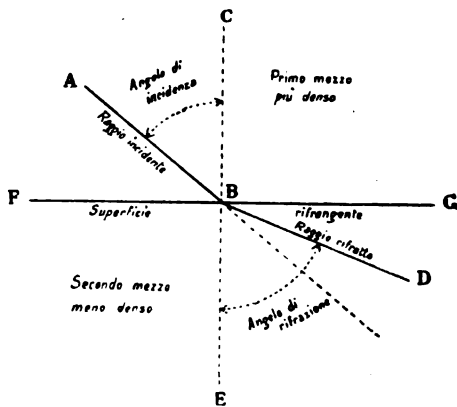



Fig. 169. *Fig. 170.*

sulla superficie di separazione di due mezzi trasparenti, la rifrazione è accompagnata da una deviazione. Per formarsi un'idea chiara delle caratteristiche di tale fenomeno, detto di *rifrazione*, conviene considerare la perpendicolare (*normale*) condotta alla superficie (*rifrangente*) del corpo trasparente dal punto (detto di *incidenza*), pel quale la luce entra nel corpo.

Il raggio di luce, deviando, potrebbe uscire dal piano individuato dal suo percorso prima della rifrazione (raggio incidente) e dalla normale. Orbene, la rifrazione avviene in modo che il raggio, pur deviando, si mantiene in un medesimo piano col raggio di incidenza e con la normale; piano che evidentemente è perpendicolare alla superficie del corpo rifrangente nel punto di incidenza. Il nuovo percorso del raggio, dopo la deviazione, costituisce il cosidetto *raggio rifratto*. A seconda che il corpo (*mezzo*) rifrangente, è più o meno denso del *mezzo* nel quale la luce si trova prima della rifrazione, la deviazione avviene in modo che il raggio rifratto si avvicina o si allontana rispettivamente dalla normale. La Fig. 169 mostra il primo caso e la Fig. 170 il secondo. Il piano del foglio sia quello individuato dal raggio incidente e dalla normale: contiene quindi necessariamente il raggio rifratto. In entrambe le

figure il tratto punteggiato, che prolunga il raggio incidente, indica il cammino che seguirebbe la luce se non avvenisse la rifrazione, se il raggio luminoso cioè non subisse la deviazione.

Fig. 171. - Effetto ben manifesto di rifrazione.

In entrambi i casi l'angolo *ABC*, formato dal raggio incidente e dalla normale, si chiama *angolo d'incidenza*, e l'angolo *DBE*, formato dal raggio rifratto pure con la normale, si chiama *angolo di rifrazione*. Nel primo caso dunque la rifrazione avviene in modo che l'angolo di rifrazione è minore dell'angolo d'incidenza e nel secondo caso la rifrazione si effettua così da rendere l'angolo d'incidenza minore dell'angolo di rifrazione.

Fig. 172. - Scatola di vetro che serve a dimostrare la rifrazione di un fascio inviato attraverso ad una massa liquida rifrangente. Consente la verifica precisa della legge della rifrazione.

Quando la rifrazione avviene nella prima maniera si dice che il secondo mezzo è più rifrangente del primo; quando invece avviene nella seconda maniera è più rifrangente il primo del secondo.

La distribuzione dei corpi trasparenti per ordine di rifrangibilità crescente corrisponde in generale alla distribuzione loro per ordine di densità crescente. Così l'acqua è più rifrangente dell'aria, l'aria è più rifrangente del vuoto e l'acqua rifrange più del vetro.

§ 168. **Indici di rifrazione relativo ed assoluto.** — Se il raggio incidente *AB* della Fig. 173, mantenendo fisso il proprio punto di incidenza, ruota intorno a *B*, così da formare con la normale un angolo d'incidenza di più in più grande, il corrispondente angolo di rifrazione cresce; ma non proporzionalmente. Non diventa cioè doppio se diventa doppio l'angolo d'incidenza, e triplo se questo diventa triplo; per modo che il rapporto fra i due angoli di incidenza e di rifrazione, fissati che siano i due mezzi, si mantenga costante.

La variazione simultanea dei due angoli avviene secondo una legge differente, la quale, col linguaggio matematico, si esprime dicendo che, fissati i due mezzi fra i quali passa la luce, *il rapporto fra il seno dell'angolo d'incidenza ed il seno dell'angolo di rifrazione si mantiene*

costante. Il valore del rapporto è caratteristico dei due mezzi, si suole rappresentare con *n* e si chiama *indice di rifrazione* del secondo mezzo relativamente al primo. Quando il primo mezzo sia il vuoto (praticamente l'aria) si dice *indice assoluto* del secondo mezzo. L'indice relativo è uguale al rapporto degli indici assoluti del secondo e del primo mezzo. Per intendere il significato della espressione più sopra usata senza la nozione di *seno* di un angolo, conduciamo col centro in *B*

(Fig. 173), una circonferenza di raggio qualunque.

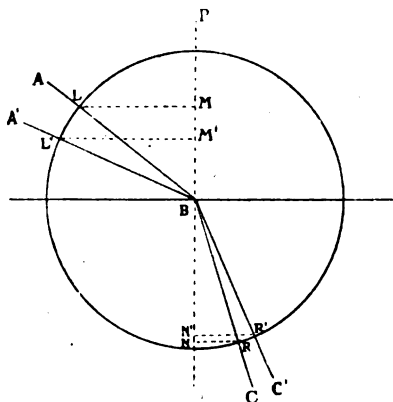



Fig. 173.

Questa circonferenza incontrerà il raggio incidente nelle varie posizioni considerate *AB*, *A'B'*... in altrettanti punti e lo stesso farà per i corrispondenti raggi rifratti *BC*, *BC'*... Dai punti di intersezione *LL'*...*RR'* conduciamo le perpendicolari alla normale *BP*. Per ogni coppia formata da un raggio incidente e dal corrispondente raggio rifratto, avremo segmenti di quelle perpendicolari come *LM* ed *NR*.

Orbene, fissati che siano i due mezzi rifrangenti associati, il rapporto fra il segmento *LM* della prima perpendicolare (quella corrispondente al raggio incidente) e il segmento *NR* della seconda (quella corrispondente al raggio rifratto) ha sempre lo stesso valore, qualunque sia la direzione del raggio incidente. Questo rapporto è appunto uguale al rapporto *n* dei due *seni*, ai quali più sopra si è alluso. Per l'aria e per l'acqua quel rapporto ha il valore 4/3. Per l'aria e il vetro ha un valore differente, ma, fissati questi ultimi due mezzi, sempre uguale a 3/2. Questi valori dicono chiaramente ciò che abbiamo già asserito, che il vetro è più rifrangente dell'acqua. È evidente che un raggio normale alla superficie rifrangente non subisce deviazione. Per il caso che la rifrazione avvenga col passaggio della luce da un mezzo meno rifrangente, la perpendicolare corrispondente al raggio incidente è più grande di quella corrispondente al raggio rifratto; l'indice di rifrazione del secondo mezzo, rispetto al primo, è quindi una frazione maggiore dell'unità, e tanto più grande dell'unità, quanto più deviato sarà il raggio di luce. Per il caso in cui la luce passi da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente, l'indice di rifrazione è invece minore dell'unità e tanto più piccolo dell'unità, quanto più deviata sarà la luce dalla direzione primitiva.

§ 169. **Leggi della rifrazione.** — Per concretare, diremo dunque che le leggi fondamentali della rifrazione sono:

1. Il raggio rifratto si mantiene col raggio incidente nel piano perpendicolare alla superficie rifrangente, condotto per il punto di incidenza.

2. Fissi i due mezzi attraverso ai quali passa la luce, il rapporto fra il seno dell'angolo d'incidenza ed il seno dell'angolo di rifrazione ha un valore costante *n*:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n. \qquad (39)$$

Questa seconda legge può enunciarsi approssimativamente (per chi non conosce la trigonometria) così:

a) fissi i due mezzi attraverso ai quali passa la luce, col crescere dell'angolo d'incidenza cresce quello di rifrazione, ma non proporzionalmente;

b) un raggio di luce, che colpisca la superficie d'un corpo trasparente in direzione ad essa perpendicolare, passa oltre senza subire deviazione.

Fig. 174.

§ 170. **Rifrazione attraverso ad un corpo limitato da facce piane e parallele.** — La rifrazione da un certo mezzo, come ad esempio l'aria, ad un altro, come l'acqua, è, in armonia col noto principio della invertibilità del cammino della luce, in tutti i suoi caratteri esattamente inversa della rifrazione dal secondo mezzo (acqua) al primo mezzo (aria).

In particolare il valore dell'indice si invertirà. Ciò in armonia col principio già enunciato dell'invertibilità del cammino della luce.

Quindi, se un raggio di luce, rifratto nel passaggio dall'aria all'acqua, è obbligato a rifrangersi più oltre, nel passaggio dall'acqua all'aria, per modo che il nuovo angolo d'incidenza sia uguale al primo angolo di rifrazione, il secondo angolo di rifrazione sarà uguale al primo angolo d'incidenza ed il raggio di luce uscirà finalmente di nuovo nell'aria, con la direzione che nell'aria stessa aveva prima; salvo che necessariamente apparirà un poco spostato parallelamente a sè stesso.

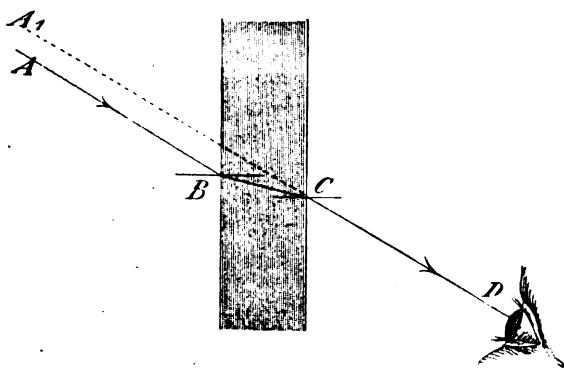



Fig. 175. - Guardando un punto *A* attraverso ad una lastra a facce parallele, lo si vede spostato in *A'*.

La condizione che il secondo angolo di incidenza uguagli il primo angolo di rifrazione è verificata quando la luce sia costretta a passare attraverso ad un mezzo trasparente, limitato da facce piane e parallele, com'è la lastra di vetro rappresentata in sezione dalla Fig. 174, col raggio *ABCD* che l'attraversa; i_1 ed i_2 sono il primo ed il secondo angolo d'incidenza; r_1 ed r_2 il primo ed il secondo angolo di rifrazione.

§ 171. **Fatti comuni della rifrazione.** — Numerosi fatti di osservazione corrente sono dovuti al fenomeno di rifrazione. Un bastone

immerso nell'acqua sembra troncato e rivòlto all'insù nella parte sommersa; un corpo posto nel fondo d'un recipiente che contenga un liquido trasparente sembra sollevato, e sollevato sembra anche il fondo stesso del recipiente; una moneta introdotta in un recipiente ad ampia apertura, ma a pareti opache, nascosta dalle pareti stesse ad un occhio che guardi nell'interno del recipiente, può esser vista quando si versi un liquido trasparente nel recipiente.

Tutto si spiega considerando che se si ha un punto luminoso A (Fig. 176) in seno ad una massa di un corpo trasparente come l'acqua e tal punto viene guardato da un occhio situato nell'aria sovrastante al corpo trasparente, deve necessariamente apparire a quell'occhio in una posizione più elevata di quella nella quale effettivamente si trova.

Difatti da A partiranno verso l'alto, oltre a tanti altri, due raggi che prima di raggiungere l'occhio attraverseranno la superficie BC e subiranno la rifrazione, accrescendo la loro divergenza. L'occhio, al solito (come vedemmo, nel caso della riflessione sugli specchi) giudicherà la luce dai raggi BD e CE e la attribuirà ad un punto luminoso A' situato là dove si incontrerebbero i prolungamenti dei due raggi BD e CE più in alto di A. Sarebbe facile calcolare questo apparente sollevamento che aumenta con la obliquità della direzione visiva. Per il caso in cui il liquido sia acqua, tale sollevamento sarebbe di 1/4 della profondità dell'acqua, in una osservazione in direzioni normali.

I punti superficiali della parte di bastone immersa nell'acqua, in quanto sono luminosi, sia pure di luce non propria, subiscono la sorte di A e ne nasce l'apparenza indicata. Lo stesso dicasi dei corpi collocati nel fondo dei recipienti contenenti liquidi trasparenti e del fondo stesso di questi recipienti. Lo stesso dicasi della moneta, cui si è accennato: in conseguenza dell'apparente suo sollevamento, è vista dall'occhio che ha in linea retta, fra sè e la moneta interposta, la parete opaca del recipiente.

§ 172. **Riflessione totale.** — Se da un mezzo più rifrangente (acqua) un raggio di luce passa normalmente ad uno meno rifrangente (aria), sappiamo che il raggio nel secondo mezzo devia, allontanandosi dalla normale. Dando al raggio incidente posizioni di più in più inclinate sulla normale, per essere l'angolo di rifrazione maggiore dell'angolo d'incidenza, arriverà un momento in cui il raggio rifratto rasenterà la superficie di separazione dei due mezzi, mentre l'angolo di incidenza avrà un certo valore l, minore di 90°. Facendo crescere anche di pochissimo questo angolo, non potrà più avvenire la rifrazione, perchè ognuna delle direzioni possibili nel mezzo meno denso corrisponde ad una direzione incidente compresa entro l'angolo l. Il mezzo meno rifrangente si comporterà quindi come un corpo opaco e il raggio si rifletterà.

L'angolo l si chiama *angolo limite*, ed è quel tale angolo d'incidenza cui corrisponde, nel passaggio della luce da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente, un angolo di rifrazione retto (Fig. 178).

L'angolo limite, per il passaggio della luce dall'acqua all'aria, è all'incirca di 48°30′ e per il passaggio dal vetro all'aria di 41°48′.

Ritornando al passaggio della luce dal corpo più rifrangente al meno rifrangente, potremo dunque dire che per angoli d'incidenza,

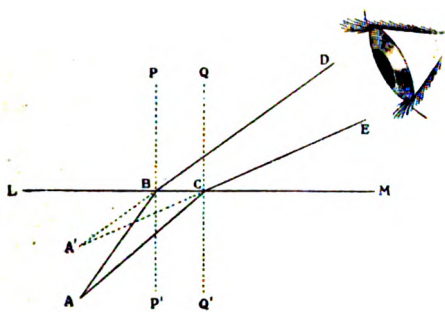
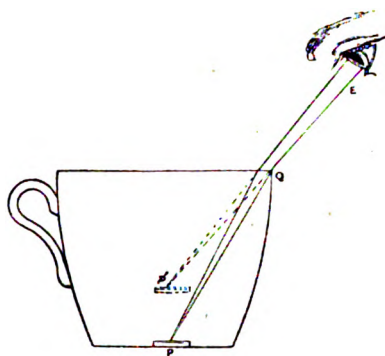



Fig. 176. *Fig. 177.*

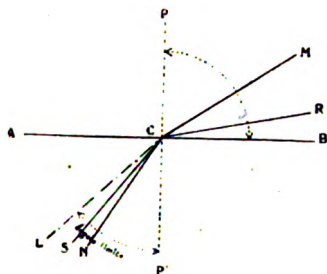



Fig. 178.

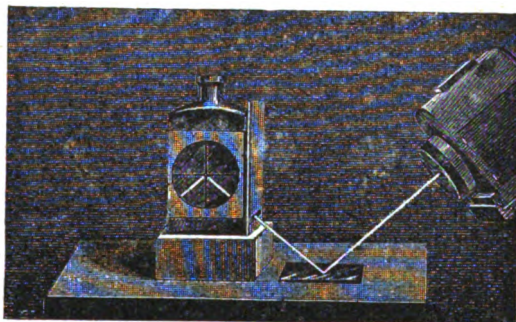



Fig. 179. - Come si può dimostrare sperimentalmente la riflessione totale.

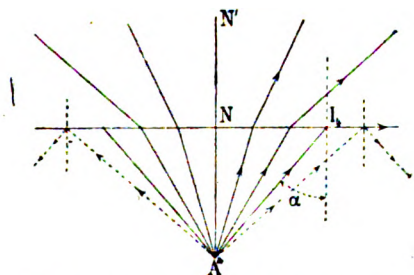



Fig. 180. - I raggi luminosi partenti da A sotto acqua subiscono, se sono entro il cono di asse AN ed in semi-apertura NAI, la rifrazione. Se sono fuori di tal cono subiscono la riflessione totale.

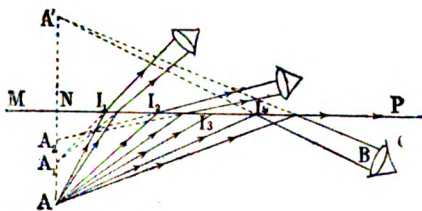



Fig. 181. - Posizioni varie dell'immagine di un punto luminoso A situato sott'acqua, in corrispondenza delle posizioni varie dell'occhio osservatore sopra e sott'acqua.

compresi entro l'angolo limite, la luce si rifrange; mentre si riflette per angoli d'incidenza maggiori dell'angolo limite. Tale riflessione, che succede, variando l'inclinazione del raggio incidente, alla rifrazione, vien detta *riflessione totale*, e segue le leggi della riflessione comune. Viene chiamata totale perchè, a differenza di ciò che succede nella comune riflessione sugli specchi, tutta la luce costituente i raggi incidenti si trova nei raggi riflessi.

§ 173. **Valore dell'angolo limite.** — Il valore dell'angolo limite si deduce facilmente dalla formola

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n,$$

nella quale si faccia $i = 90°$. Poichè sen $90° = 1$, e per $i = 90°$, r diventa l'angolo limite l, sarà

$$\frac{1}{\text{sen } l} = n,$$

ossia

$$\text{sen } l = \frac{1}{n}. \qquad (40)$$

In modo generale si può quindi dire che il seno dell'angolo limite è uguale all'inverso dell'indice di rifrazione del mezzo più rifrangente, relativamente al meno rifrangente.

§ 174. **Prismi a riflessione totale - Miraggio e fata morgana - Fontane luminose.** — In ottica si usano molto frequentemente masse trasparenti (di vetro o d'altro) che hanno la forma di prismi triangolari, e che si posano spesso sopra colonne metalliche a lunghezza variabile, come mostra la Fig. 191:

Fig. 182.

costituiscono i *prismi ottici*.

Prismi, quali quelli che hanno per sezione un triangolo equilatero od un triangolo isoscele, danno facilmente il fenomeno della riflessione totale, come mostra il disegno della Fig. 182, epperò si usano frequentemente in luogo di specchi, per economizzare, quando occorra, in luce.

Fig. 183. - Un fascio convergente proveniente da *DD'* si rivolge verso la bocca d'uscita dell'acqua e subisce alla superficie interna del getto la serie di riflessioni totali che rappresenta la figura e che rendono ben luminoso il getto medesimo.

La riflessione totale spiega il notissimo e bel fenomeno del miraggio, che può assumere aspetti vari, ad uno dei quali si dà più specialmente il nome di *fata morgana* e che in ogni caso è dovuta alla diversa densità dei vari strati dell'atmosfera.

La riflessione totale è applicata, come vedremo, in molti strumenti ottici. Citiamo qui l'applicazione seria ai *periscopi* per sottomarini e la dilettevole alle fontane luminose (Fig. 183).

CAPITOLO XVII.

LA DEVIAZIONE PRISMATICA E LA DISPERSIONE.

§ 175. **Deviazione prismatica.** — Prendiamo una lampada ad alcool, accendiamola e carichiamone continuamente la fiamma con del sal marino. Muniamoci di un prisma di vetro triangolare come quello rappresentato dalla Fig. 184 e che per semplicità si suol rappresentare in sezione mediante un triangolo isoscele (Fig. 185) del quale l'angolo al vertice si dice rappresentare l'angolo rifrangente del prisma e la base, la *base del prisma*. Facciamo buio nell'ambiente nel quale ci troviamo, mentre la fiamma continua ad ardere, dando una luce d'un giallo

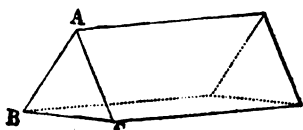



Fig. 184. *Fig. 186.*

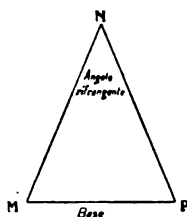
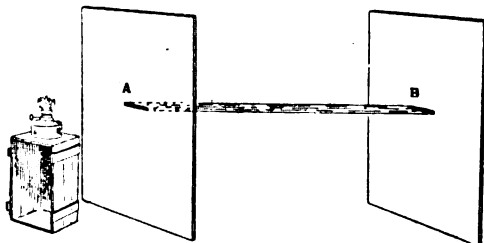
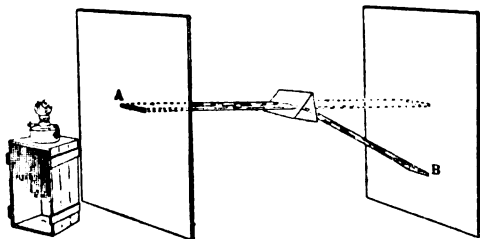



Fig. 185. *Fig. 187.*

caratteristico. Valendoci di uno schermo di cartone (Fig. 186), nel quale sia praticata una fenditura *A* non troppo ampia, isoliamo dalla luce che emana tutt'intorno alla fiamma, un fascio di raggi che vada a colpire, ad esempio, un diaframma di cartone bianco. Su di esso si formerà una striscia gialla *B*, in linea retta coll'apertura *A* e con la lampada *L*.

Mettiamo adesso sul cammino del fascio *AB* il prisma ottico (Fig. 187), per modo che il fascio medesimo lo investa su una delle sue facce. Il fascio passerà attraverso alla massa trasparente del prisma, ma all'uscita avrà una direzione marcatamente diversa dalla primitiva, colpirà il diaframma di cartone non più dove lo colpiva prima, ma più in basso.

La faccia sulla quale arriva il fascio luminoso, rappresentato nella Fig. 185 dal lato *MN*, si chiama *faccia di incidenza*, e quella *MP* dalla quale emerge il raggio luminoso, si dice *faccia di emergenza*.

Potremo dunque dire che un fascio od un raggio di luce, che investa una faccia d'un prisma, ne esce deviato verso la base di questo.

Del fatto ci si può render conto, considerando la Fig. 189, nella quale sono indicate le due rifrazioni che subisce un fascio di luce, una volta attraverso alla faccia d'incidenza e l'altra attraverso a quella di emergenza. In essa la deviazione subìta del raggio *SI* è rappresentata dall'angolo *D*, detto di *deviazione*.

§ 176. **Relazioni fondamentali relative alla deviazione prismatica.** — Vediamo da quali elementi dipenda l'angolo di deviazione D. Consideriamo un prisma triangolare (Fig. 189): sia SI un raggio incidente, MN' la perpendicolare ad AB, e quindi SIN l'angolo d'incidenza i. Indichiamo con r l'angolo di rifrazione del raggio SI, con r' l'angolo che il raggio rifratto II' fa con la normale in I' alla seconda faccia del prisma, e con e l'angolo di emergenza $MI'E$. Prolunghiamo le SI e $I'E$ fino ad incontrarsi. L'angolo D, da esse formato, è l'angolo di deviazione, mentre l'angolo A, dato dalle due facce del prisma per le quali passa la luce, è l'angolo rifrangente.

Prolunghiamo le due perpendicolari NI e $I'M$ fino ad incontrarsi in P e consideriamo il quadrilatero $IAI'P$: in questo, essendo retti gli angoli in I e in I', gli altri due O e P saranno supplementari. Ma dal triangolo $II'P$ abbiamo che l'angolo P è supplementare di $r + r'$ e quindi sarà:

$$A = r + r'. \qquad (41)$$

Consideriamo ora l'angolo di deviazione D: essendo esterno al triangolo IOI' esso sarà uguale alla somma dei due angoli interni ed opposti OII' e $OI'I$; ma come si vede è $OII' = i - r$ e $OI'I = e - r'$, quindi sarà $D = i - r + e - r'$, cioè $D = i + e - (r + r')$: ed essendo $r + r' = A$, sarà:

$$D = i + e - A, \qquad (42)$$

la qual formola ci dice che *l'angolo di deviazione dipende dall'angolo d'incidenza, dall'angolo d'emergenza e da quello di rifrangenza.*

Le formole (41) e (42), insieme alle $\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n$, $\frac{\text{sen } e}{\text{sen } r'} = n$ che danno il valore dell'indice di rifrazione del materiale costituente il prisma, permettono di risolvere tutti i problemi relativi alla deviazione prismatica. Quando l'angolo del prisma è molto piccolo e che l'angolo i sia pure molto piccolo, le formole del prisma si possono ridurre alle seguenti:

$$i = nr, \; e = nr', \; A = r + r', \; D = (n - 1)A. \qquad (43)$$

§ 177. **Deviazione minima - Misura degli indici di rifrazione.** — Nel caso che i ed e siano uguali fra loro, cioè quando l'angolo d'incidenza è uguale a quello d'emergenza, si ha per D il valore minimo possibile, cioè si ottiene dal prisma la deviazione minima. La possibilità di questa deviazione minima si può verificare sperimentalmente, facendo ruotare su sè stesso il prisma attraversato dal raggio luminoso; la deviazione che subisce questo raggio, dapprima diminuisce, ma arrivata ad un certo punto torna a crescere, dimostrando così che, per quanto piccola sia la deviazione, essa non potrà mai ridursi a zero, ma rimarrà sempre al di sopra di un certo limite: se, quando si è ottenuto la deviazione minima, si misurano gli angoli incidente ed emergente, si trova che sono uguali e quindi saranno uguali r ed r'.

In virtù di questi fatti si ha modo di valutare l'indice di rifrazione di una sostanza che si foggi a prisma, quando si misuri l'angolo rifrangente A e si determini l'angolo d di deviazione minima per la luce che la attraversi. Nella condizione di deviazione minima si ha difatti: $r = r'$, e quindi $r = \frac{A}{2}$; $i = e$ e quindi $i = \frac{d + A}{2}$. Si può quindi

scrivere:

$$n = \frac{\operatorname{sen} \frac{d + A}{2}}{\operatorname{sen} \frac{A}{2}}, \qquad (44)$$

formola che risolve il problema.

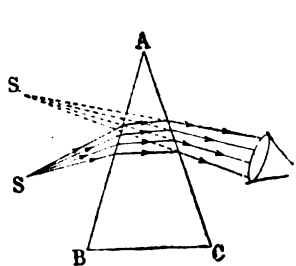



Fig. 188. - In virtù della deviazione prismatica, un punto S guardato attraverso ad un prisma si vede sollevato.

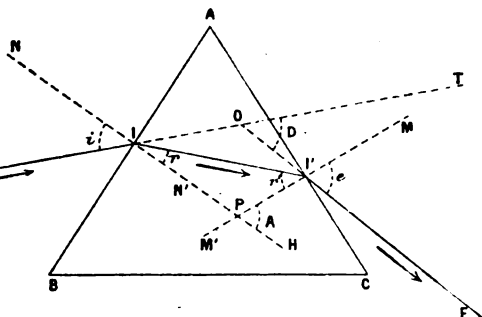



Fig. 189.

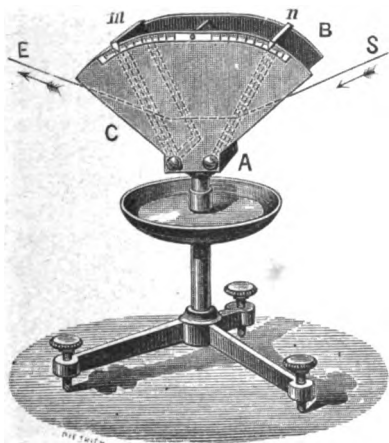



Fig. 190. - Un prisma ad acqua od a liquido in genere, colle facce m ed n in vetro e girevoli. Serve a dimostrare l'influenza dei vari elementi sulla deviazione prismatica.

Fig. 194.

Fig. 191. - Un prisma ottico montato su sostegno.

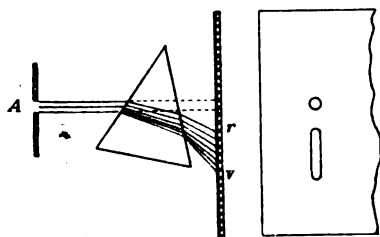
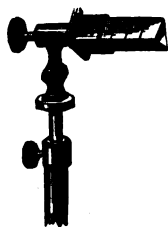



Fig. 193. - Il poliprisma formato dalla successione di prismi di uguale dimensione ma di materiale diverso. Serve a mostrare come le varie sostanze operano varia deviazione e varia dispersione.

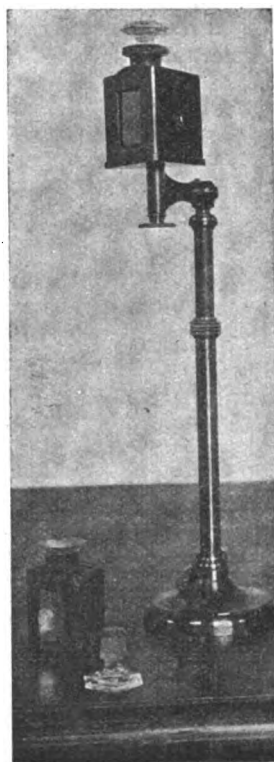



Fig. 192. - Si formano anche dei prismi con materiale liquido valendosi di bottigliette a sezione triangolare con due pareti formate da lastrine a facce perfettamente piane e parallele.

§ 178. **A parità di angolo rifrangente e di angolo d'incidenza varie sostanze rifrangenti operano varia deviazione.** — Lo si può dimostrare col prisma multiplo della Fig. 193, detto *poliprisma*.

§ 179. **Deviazione delle varie luci colorate.** — Eseguendo l'esperienza del § 175 con differenti luci colorate si noterebbe che la deviazione prismatica è diversa, a parità di tutte le altre circostanze, per le diverse luci colorate.

§ 180. **Dispersione.** — Ripetiamo adesso l'esperienza, facendo passare attraverso al foro *A* (Fig. 194) un fascio di luce bianca che, salvo il colore e la intensità luminosa, sostituisca i fasci precedentemente considerati. Sia la luce di una lampada elettrica ad arco, o quella proveniente da un solido o da un liquido incandescente.

Ebbene, con questa luce si ottiene sul diaframma di cartone bianco, un po' più sotto del luogo ove il fascio dà (quando non si usa il prisma) una chiazza bianca, una striscia variamente colorata, dal rosso, all'aranciato, al giallo, al verde, all'azzurro, all'indaco, al violetto. Si tratta dell'impressione, sul diaframma, d'un ventaglio di raggi variamente colorati emergenti dal prisma (Fig. 194). La striscia riceve il nome di *spettro*.

Il fenomeno è detto di *dispersione* della luce, e si spiega facilmente, ammettendo che la luce, che noi chiamiamo bianca, sia una luce composta da una infinità di luci semplici tutte colorate. Il prisma deviando, come abbiam detto, in misura diversa, le diverse luci colorate, separa in conseguenza di questa diversa deviazione che opera, le varie luci colorate semplici costituenti la luce bianca, le distribuisce a ventaglio, e questo, incontrando lo schermo, dà quella impressione, variamente colorata, che riceve il nome di spettro.

Fig. 195. - Come conviene operare per ottenere un buono spettro. Si prepone al prisma una lente convergente *L*.

L'esperienza del prisma costituisce quindi, in certo modo, un'*analisi* della luce bianca. Per ottenere uno spettro puro, privo di sovrapposizione di varie radiazioni colorate, conviene usare (Fig. 195) una sottile fenditura *O* e interporre in posizione conveniente, fra questa ed il prisma *P*, una lente *L*. Come vedremo, mercè l'interposizione della lente, i raggi di ognuna delle luci costituenti la luce bianca e partenti dalla fenditura, vanno a dare sullo schermo tante immagini successive della fenditura quante sono le luci; e se la fenditura è sottile, queste immagini non si sovrappongono due a due sensibilmente, come avverrebbe invece se la fenditura fosse larga.

Lo spettro apparisce se lo si osserva senza attenzione, colorato da poche luci, che un tempo anzi si ritennero sette (rossa, aranciata, gialla, verde, azzurra, indaco, violetta). Osservato invece con attenzione, si nota in esso la successione di infinite luci: tutte quelle che occorrono per procedere, con sfumature continue, dal rosso al verde al violetto.

Ma il prisma devia verso la base un fascio di luce che lo attraversi,

in causa delle due rifrazioni che successivamente avvengono per il fascio di luce sulla faccia d'incidenza e su quella d'emergenza. Bisognerebbe, per spiegare la deviazione diversa per le diverse luci colorate, ammettere che il fatto primitivo della rifrazione avvenisse, fissi i due mezzi, in misura diversa per le diverse luci colorate semplici.

Orbene, è proprio così che avviene.

Ne segue che il bel fenomeno della dispersione della luce è una conseguenza del fatto che *la rifrazione semplice, a parità di tutte le circostanze, si effettua in misura diversa per le diverse luci colorate semplici.* A rigore, ogni mezzo rifrangente ha un indice di rifrazione diverso per le diverse luci semplici. I valori dell'indice, da noi dati nei precedenti paragrafi, riguardavano a rigore la luce gialla della fiamma del sodio.

§ 181. **Esperienze di sintesi della luce bianca - Persistenza delle sensazioni luminose - Prismi acromatici.** — Si sono immaginate numerose esperienze (Fig. 197 e 200) per convalidare (per via di ricomposizione o di sintesi) l'idea della complessità della luce bianca. Fra esse merita di essere citata la esperienza detta del *disco di Newton*: esperienza di sintesi, perchè tende a provare la formazione della luce bianca con la fusione delle supposte luci semplici componenti. La esperienza del prisma costituisce invece una analisi della luce bianca, in quanto mira alla separazione di essa nelle luci semplici costituenti.

Fig. 196.

Per intendere l'esperienza del disco di Newton, bisogna sapere che nel nostro occhio le impressioni luminose durano per breve tempo dopo la eccitazione; si ha, come si dice, la *persistenza delle sensazioni luminose.*

Fig. 197. - Come il lettore può eseguire l'esperienza del disco di Newton, forandolo nel centro, sostenendolo su di un bastoncino e mettendolo in moto di rotazione su di esso.

Se si pone in rotazione, intorno al proprio asse, un disco bianco (Fig. 196), su cui sia segnato il punto *A*, dato che la rotazione sia rapida, il punto stesso si vede per qualche tempo in tutte le posizioni da esso successivamente occupate, per effetto della rotazione del disco; per tutto l'arco *AA'*, ad esempio. Così la bragia di un sigaro acceso, che si faccia muovere rapidamente, ci dà l'illusione di un nastro luminoso.

Orbene, se sopra vari settori di un disco (di Newton), cui si possa imprimere un moto di rotazione intorno ad un asse passante per il suo

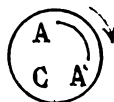
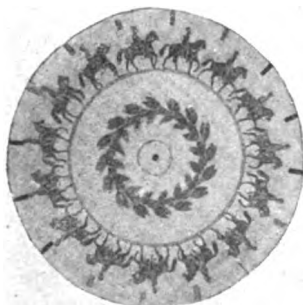



Fig. 198.

Facendo ruotare dinanzi ad uno specchio questi dischi, per modo che le figure rappresentative di posizioni successive occupate da un cavalleggero e da un falegname che sega, vi si riflettano; dopo aver fissato l'occhio attraverso ad una delle numerose intaccature dell'orlo dei dischi, così da vedere la immagine, nello specchio si osserva il cavalleggero che corre sul suo destriero ed il falegname che sega. È questo il principio dei notissimi cinematografi.

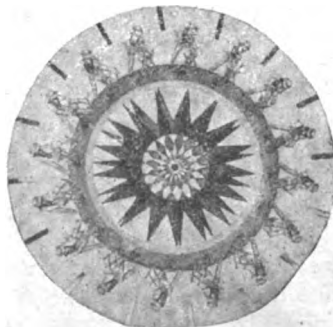



Fig. 199.

centro, si depongono colori che diffondano le principali luci dello spettro, e poi si fissa un punto del disco, mentre lo si pone in rapida rotazione, per la persistenza delle sensazioni luminose, il nostro occhio viene simultaneamente colpito da tutte quelle luci, e, in riprova di quel che si è detto sulla costituzione della luce bianca, il disco appare bianco (Fig. 197). Non perfettamente bianco però, perchè le luci costituenti la luce bianca, essendo infinite, sul disco permangono pochi colori, capaci di diffondere le più salienti. La mancata perfezione del bianco è maggior conferma del concetto espresso sulla complessità della luce bianca. Altra esperienza di ricomposizione è quella indicata dalla Fig. 200.

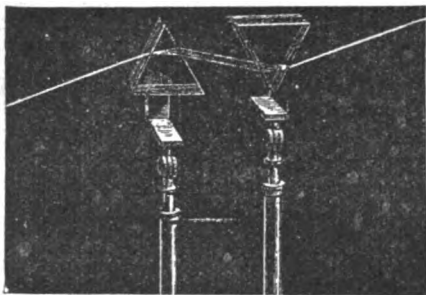



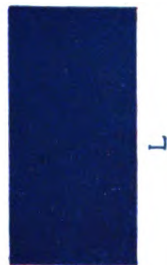
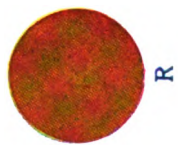
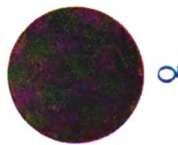
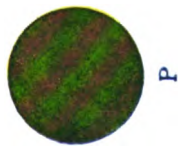
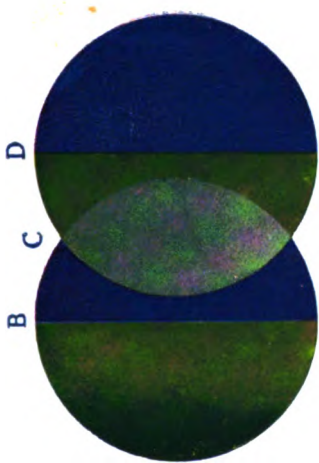
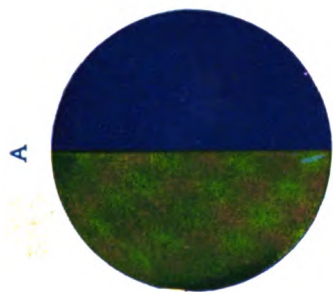
Fig. 200. - Altra esperienza di ricomposizione. La luce decomposta dal primo prisma viene ricomposta dal secondo disposto in senso inverso.

Invece di adoperare due prismi identici disposti in senso inverso, si possono adoperare due prismi di materiale differente, che, avendo angolo rifrangente diverso, addossati l'uno all'altro costituiscono nel complesso ancora un prisma. Siccome questo prisma non dà dispersione, lo si chiama *acromatico*. Esso dà però la deviazione della luce, mentre nel caso dei due prismi uguali ed opposti colla dispersione si sopprime anche la deviazione sostituendosi questa con uno spostamento della luce parallelamente a sè stessa.

§ 182. **Raggi ultrarossi ed ultravioletti.** — Oltre alla regione colorata, della quale si è detto, lo spettro di un fascio di luce bianca è costituito da due regioni non visibili, una precedente il rosso e l'altra successiva al violetto, dette rispettivamente *regioni ultrarossa* ed *ultravioletta.* La prima è costituita da radiazioni (ultrarosse) che si possono mettere in rilievo in virtù del loro potere calorifico (comune del resto, sebbene in misura varia, alle altre radiazioni dello spettro) coi noti metodi di studio del calor raggiante. L'altra da radiazioni (ultraviolette) che si possono mettere in rilievo in virtù di effetti chimici, elettrici, o di fluorescenza (§ 183).

§ 183. **Fluorescenza - Fosforescenza.** — Vi sono certi corpi che, esposti nell'oscurità all'azione di radiazioni ultraviolette, divengono luminosi di una luce varia per i vari corpi. I corpi si dicono *fluorescenti* ed il fenomeno indicato fenomeno di *fluorescenza.*

Siccome nella luce solare si trovano in discreta quantità radiazioni ultraviolette, si ha che i corpi fluorescenti mostrano il fenomeno di fluorescenza, anche se esposti alla luce solare. La luce che essi emettono è di colore diverso da quello che essi stessi possiedono e che può osservarsi per trasparenza. Una soluzione alcoolica di fluorescina è fluorescente. Nell'oscurità apparisce verde, quando venga colpita da raggi ultravioletti; alla luce solare apparisce rossa, se guardata per trasparenza, mentre si mostra verde alla superficie per la luce di fluorescenza che diffonde. La fluorescenza è più spesso e specialmente eccitata dalle radiazioni ultraviolette, ma in certi corpi è

A
B
A
B
C
D
E
F
G
H
P
Q
R
M
L
N
O

Le due bottigliette A e B rappresentano una medesima bottiglietta contenente una soluzione alcoolica di fluorescina, vista rispettivamente per trasparenza e per diffusione.

I tre dischetti, P, Q ed R diffondono le *tre luci fondamentali.*

Un fascio di luce a due colori che formerebbe per proiezione il disco A viene, mediante un piccolo prisma ad angolo molto acuto, sdoppiato così da dare i due dischi B e D che si sovrappongono parzialmente in C. Qui corrispondentemente si ha la parziale sovrapposizione delle due luci colorate. Analoga operazione si effettua per il disco E del quale le due luci che diffonde si sovrappongono in G. Senonchè, le due luci che diffonde A essendo di una delle metà dello spettro rispetto al verde centrale, da C si ha luce spettrale a posizione intermedia fra le due; e le due luci che si diffondono da E essendo una di una di tali metà e l'altra dell'altra, danno da G la diffusione di una luce porpora.

I due rettangoli L ed N ottenuti per deposizione dei colori che mescolati assieme danno il colore del rettangolo O, diffondono luci, che, sovrapposte per rifrazione rispettivamente e per riflessione in una lamina di vetro collocata in M perpendicolarmente al piano della Tavola, si compongono in una luce porpora secondo viene indicato nel testo.

determinata anche da altre radiazioni della regione visibile dello spettro.

Verso l'anno 1602, un ciabattino di Bologna, certo Casciarolo, scoprì, che, facendo subire una calcinazione parziale allo *spato pesante* (solfato di bario) che si trovava in discreta quantità nelle vicinanze di quella città; mantenendo quel minerale per qualche tempo alla luce, lo si aveva poi luminoso quando veniva messo nella oscurità. Di ciò parla un singolare volumetto pubblicato a Roma da Marc'Antonio Cellio sotto il titolo: *Il Fosforo, ovvero la pietra bolognese, preparata per rilucere fra l'ombra.*

Si trattava difatti di un qualche cosa di analogo a ciò che mostra il fosforo. Questo corpo però è luminoso nell'oscurità, in virtù d'un fenomeno chimico (lenta ossidazione), che non si manifesta invece nella fosforescenza vera e propria, la quale appare come fenomeno fisico.

Ad ogni modo, per l'apparente analogia alla quale si è accennato, il minerale si chiamò *fosforo di Bologna,* ed il fenomeno in parola si disse di *fosforescenza.*

Sono fosforescenti: il solfuro di calcio, il solfuro di bario e il solfuro di stronzio, il diamante e molti altri corpi.

La durata della fosforescenza è variabilissima, a parità di illuminazione, per le diverse sostanze fosforescenti. Per qualche corpo è di giornate intere, per altri di ore o anche di minuti e di secondi.

Non necessita la luce bianca per produrre il fenomeno della fosforescenza. Si può ricorrere a luci semplici colorate. Servono bene, in genere, le luci dell'estremo violetto e le radiazioni ultraviolette. La luce dovuta alla fosforescenza è però diversa, per il colore, da quella che eccita il fenomeno. Per le luci emesse si ha (legge di Stokes) che sono nello spettro più deviate verso l'estremo rosso che non la luce eccitatrice. E varia da corpo a corpo, oltre che col variare dello stato fisico.

Certi corpi si mostrano fluorescenti solo se portati a temperature convenienti, più o meno elevate. Si dicono *termoluminescenti.*

Non vi ha alcun dubbio che, almeno a prima vista, si possono ritenere della stessa natura i tre fenomeni indicati di fluorescenza, di fosforescenza e di termoluminescenza. Per ciò che riguarda la termoluminescenza, si sa che è tutta questione di temperatura, perchè, in fondo, essa si riduce a vera e propria fosforescenza. Quanto poi alla fosforescenza la si può considerare come una fluorescenza che perdura oltre il periodo di eccitazione diretta; e per converso la fluorescenza si può considerare come una fosforescenza istantanea o pressochè istantanea.

Non solo le radiazioni finora considerate hanno la possibilità di provocare i fenomeni qui indicati, ma in modo marcatissimo li provocano altre radiazioni di natura diversa, che impareremo a conoscere più avanti. Si è pensato che i fenomeni consistan in una trasformazione di alcune radiazioni (le eccitatrici), in altre (quelle emesse).

§ 184. **Fototropia.** — Un fenomeno che sembra legato con la fosforescenza e con la fluorescenza è il seguente, detto di *fototropia*: certe sostanze, esposte alla luce solare o a radiazioni convenienti, come le ultraviolette, cambiano colore a poco a poco. Riscaldate, o lasciate nell'oscurità, ritornano lentamente alla colorazione primitiva, pronte a subire lentamente gli stessi processi più e più volte.

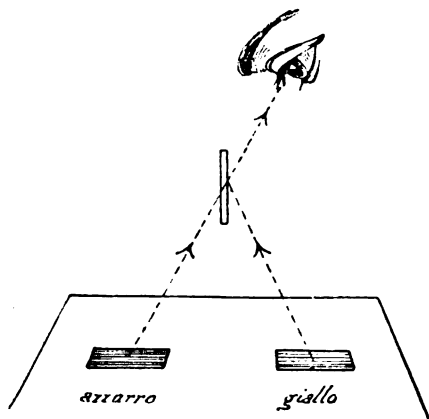
CAPITOLO XVIII.

LUCI E COLORI.

§ 185. **Somma di luci.** — Le luci colorate dello spettro continuo di un solido incandescente, fuse insieme, abbiam detto, ricostituiscono la luce bianca. Associate a due a due, a tre a tre, danno certi effetti, alcuni dei quali vanno ricordati.

Fra le radiazioni verdi esiste una radiazione, detta *verde centrale*, tale, che una luce situata fra essa e il rosso estremo, associata ad una luce situata fra essa e l'estremo violetto, dà, o la luce bianca, o una luce color porpora, non esistente fra le luci dello spettro. Quando due luci semplici, fuse insieme, danno la luce bianca si dicono *complementari*.

Associando comunque due luci situate entrambe da una medesima parte del verde centrale, si ottiene come risultato una luce dello spettro intermedia ad esse. Associando in proporzioni diverse tre luci, come l'aranciata, la verde e la violetta, si possono avere tutte le altre luci, compresa la bianca. Quelle tre luci si chiamano *fondamentali*, e costituiscono la base della fotografia a colori.

Proiettando su di uno schermo bianco un fascio di luce bianca, che passi attraverso ad un filtro, atto per metà a lasciar passare una sola luce, e per l'altra metà un'altra luce (due vetrini, l'uno d'un colore e l'altro d'un altro); indi deviando con un piccolo prisma di vetro una parte dei raggi del fascio, si può ottenere la parziale sovrapposizione di una delle luci sull'altra, e verificare così quanto si è detto circa l'addizione di due luci. (V. prima Tavola a colori).

La stessa cosa si può ottenere, ma con effetto meno marcato, valendosi di una semplice esperienza indicata dalla Fig. 201 preparata nella Tavola su citata. Guardando per trasparenza attraverso al vetrino, disposto perpendicolarmente al foglio nella posizione *A*, il rettangolo azzurro, che si vede per riflessione sovrapposto al rettangolo giallo, si osserva sul vetro una luce composta color porpora. Che l'unione della luce azzurra con la gialla dia luce porpora, può vedersi ponendo in rotazione un disco simile a quello di Newton ma coi settori colorati alternativamente in giallo ed in azzurro. Si tratta in questo caso dell'utilizzazione della persistenza delle sensazioni luminose nell'occhio.

azzurro *giallo*

Fig. 201.

§ 186. **Colore dei corpi - Miscela di colori.** — I corpi possono differire, come ben si sa, per il loro colore; alcuni sono bianchi, altri neri, altri rossi e così via. E la colorazione loro si manifesta per *trasparenza* o per *diffusione*. Se interponiamo un corpo trasparente fra una sorgente luminosa e l'occhio, questo, riceve la luce trasmessa dal corpo: è il colore di questa luce che costituisce il *colore del corpo* veduto per trasparenza.

Se, al contrario, l'occhio è situato dalla stessa parte della sorgente rispetto al corpo, riceve la luce riflessa o diffusa, ed il colore di questa costituisce il colore del corpo, veduto per riflessione o per diffusione. Teniamo presente che per avere un punto di riferimento, si è convenuto di considerare come colore del corpo quello che presenta, allorchè riceve luce bianca, la luce del giorno ad esempio.

Quanto alla colorazione per trasparenza, i corpi sono detti *incolori* (acqua, vetro ordinario ecc.) quando lasciano passare interamente la luce bianca, o, in proporzioni uguali, tutte le luci semplici costituenti lo spettro; sono detti *colorati*, quando lasciano passare certe luci semplici e non si lasciano attraversare da altre, o più generalmente lasciano passare in proporzioni disuguali le diverse luci semplici dello spettro.

Un vetro ci sembra rosso, verde o azzurro quando lascia passare unicamente, o in proporzione maggiore, i raggi rossi, verdi o azzurri.

Quanto alla colorazione per diffusione, che è la più comune, va osservato che i vari corpi possono assorbire o rimandare tutte (o parte, o in proporzione diversa) le diverse luci semplici dello spettro.

Un corpo è *bianco* se *rimanda* tutte (o in proporzione uguale) le diverse luci semplici costituenti la luce bianca che lo investe. Se tutte queste luci sono nella stessa proporzione rimandate anche in piccola quantità, il corpo appare grigio. Un corpo è *nero* se *assorbe* tutte le radiazioni semplici, costituenti la luce bianca che lo illumina. Un corpo è *colorato* se *rimanda* soltanto alcune (o in proporzione diversa) luci semplici, costituenti la luce bianca che lo colpisce. Così è rosso, o giallo, o verde un corpo che, delle luci semplici costituenti la luce bianca, rimanda esclusivamente o in proporzione prevalente le radiazioni rosse, gialle o verdi.

Ripetute prove circa la bontà di questo modo di vedere si hanno da comuni osservazioni e da esperienze semplici.

Il colore dei corpi varia col variare della natura della sorgente. Alla luce del giorno è diverso che alla luce di una candela. Un corpo che di giorno ci appare azzurro, alla luce di una candela ci sembra quasi nero, perchè non ha radiazioni da rimandare, in quanto non riceve che le radiazioni giallastre che assorbe. Un corpo rosso alla luce verde ci sembra nero, come ci appar nero un prato, osservato attraverso un vetro rosso.

L'occhio normale ha la possibilità di visione di tutte le luci colorate, e se lo si obbliga a ricevere a lungo una determinata luce può, per stanchezza, avere attenuata la facoltà di visione di essa, mentre la visione di tutte le altre si è conservata intera. Obbligando l'occhio a guardare un corpo che diffonda uniformemente luce bianca, dopo che avrà guardato un corpo diffondente luce di un certo colore, il corpo gli apparirà colorato di luce *complementare* a quella che prima lo colpì a lungo. Del pari, fissando ad esempio una stella di carta, colorata in *rosso*, e dopo qualche tempo rivolgendo lo sguardo su di un foglio bianco, si vede spiccare su questo una stella *verde* (il verde essendo complementare del rosso) per la stanchezza dell'occhio nella regione colpita a lungo dalla luce diffusa dalla stella rossa. Può servire molto bene ad una esperienza di questo genere una stella verde in campo rosso.

Va notato che non va confusa la somma delle luci con la miscela delle sostanze coloranti. Mescolando insieme i due colori che nel rettangolo diffondono luce gialla e luce azzurra, si ottiene il colore rappre-

sentato nel rettangolo *O* (vedi Tavola) di color verde, posto a lato; ben differente dal colore porpora che ha la luce ottenuta con l'addizionare le luci gialla ed azzurra. Nell'assorbimento non completo, per trasparenza o per diffusione, si ha sempre che il corpo assorbente opera in modo da lasciar passare o da rimandare una luce principalmente, e, meno intensamente, le attigue nello spettro da una parte e dall'altra. L'aspetto di una miscela di colori o della luce che attraversa vetri colorati sovrapposti è quello corrispondente alle sottrazioni effettuate nel modo suindicato. Due vetri, uno azzurro (che lascia passare la luce azzurra in preminenza, e, meno le luci verdi ed indaco) ed uno giallo (che lascia passare la luce gialla in preminenza, e, meno le luci aranciata e verde) sovrapposti che sieno, delle infinite luci di un fascio di luce bianca che li investa, non posson lasciar passare che la verde.

Sulla somma dei colori è basato il comune *processo di tricromia*, che si serve dei tre colori primitivi dalla cui combinazione varia si possano ottenere tutti gli altri dei pittori: il giallo, il rosso, e l'azzurro.

Nella tricromia, con procedimenti opportuni, si forma dapprima, per un corpo colorato qualsiasi da riprodursi, una triade di *clichés*; uno ritraente tutte le parti del corpo che siano rosse o d'un colore contenente il rosso, un secondo ritraente tutte le parti azzurre ed un terzo tutte le parti gialle; si procede poi alla stampa con le macchine tipografiche, incominciando dal *cliché* colorato in giallo e sovrapponendo successivamente ed esattamente il rosso e l'azzurro.

CAPITOLO XIX.

LE LENTI.

§ 187. **Rifrazione attraverso ad una superficie curva.** — Finora ci siamo occupati del passaggio della luce da un mezzo trasparente ad un altro, avente la sua superficie libera piana, poi del passaggio della luce attraverso ad un mezzo trasparente limitato da facce piane e parallele; finalmente del passaggio della luce attraverso ad un mezzo trasparente limitato da due facce piane non parallele, così da formarci un'idea della deviazione prismatica, della dispersione e dei prismi a riflessione totale. Supponiamo adesso che un punto luminoso mandi parte della propria luce da un mezzo trasparente (aria ad esempio) in un altro mezzo trasparente, come vetro, la superficie di separazione essendo comunque incurvata. Per ogni raggio luminoso la rifrazione avverrà evidentemente secondo le leggi generali già indicate, considerando quale superficie rifrangente quella tangente alla superficie del corpo trasparente nel punto d'incidenza.

Ci riferiremo al caso che la superficie curva sia sferica, e la rappresenteremo coll'arco di cerchio *AB*, del quale *O* sarà il centro.

Per un raggio luminoso *LM* che si diriga dall'aria alla superficie *AB* di una massa di vetro, si avrà un angolo d'incidenza *LMP* (il raggio *OP* della sfera che va al punto di incidenza essendo la normale) ed un angolo di rifrazione *NMO*, minore di quello d'incidenza.

Poichè un comportamento analogo avrà ogni altro raggio partente dal medesimo punto luminoso *L* e che investa la superficie *AB*, ci si

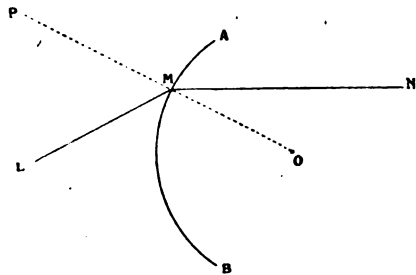
potrà chiedere se, dopo la rifrazione, i vari raggi luminosi concorreranno in un unico punto (immagine di L).

Fig. 202.

Orbene, si dimostra che tale concorrenza ha luogo se la superficie curva è di piccola apertura nel senso già indicato per gli specchi. Di più si può dire che se la superficie del secondo mezzo, più rifrangente del primo, è convessa, i raggi luminosi concorreranno per dare una immagine reale; mentre se la superficie è concava, i raggi rifratti assumeranno un andamento divergente, tale che i loro prolungamenti si incontreranno in un punto, immagine virtuale del punto luminoso.

In generale, se p rappresenta la distanza del punto L dalla superficie di separazione, p' la distanza della corrispondente immagine, n_1 ed n_2 gli indici assoluti dei due mezzi trasparenti, R il raggio di curvatura della superficie, si ha:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{p'} = \frac{n_2 - n_1}{R}; \qquad (45)$$

con p e p' positivi o negativi a seconda che il punto luminso e l'immagine corrispondentemente sono rispettivamente reali o virtuali, e con R positivo o negativo a seconda che si trova dal lato della emergenza o da quello della incidenza. Dal caso di due mezzi a quello di più mezzi separati due a due da superfici sferiche coi centri su una medesima retta.

§ 188. **Lenti - Classificazione - Centro ottico.** — Interessa considerare, per le numerose applicazioni che se ne possono trarre, certi mezzi trasparenti, limitati da facce curve e da facce piane e curve, che ricevono il nome di *lenti*. Il caso più semplice è quello in cui le facce curve siano sferiche. Si può ritenere che si tratti di tre mezzi rifrangenti, il primo ed il terzo dei quali uguali fra loro e costituiti da aria, separati due a due da superfici sferiche. Il loro comportamento può studiarsi considerando due passaggi di luce successivi nelle condizioni del § 187. Ad ogni punto luminoso che mandi raggi attraverso al sistema deve corrispondere un'immagine, se le superfici di separazione sono di piccola apertura. Le lenti *sferiche* si dicono *convergenti* o *divergenti*, a seconda che possiedono una maggiore grossezza al centro o alla periferia, rispettivamente.

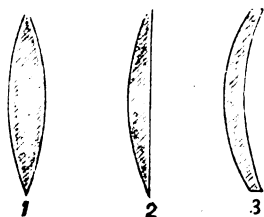



Fig. 203.

Le *lenti convergenti principali* sono: 1° La biconvessa, colle facce entrambe convesse (Fig. 203-1); 2° la piano-convessa, con una delle facce sferica convessa e l'altra piana (Fig. 203-2); 3° il menisco convergente, colle facce entrambe curve, una, la più incurvata, convessa, e l'altra, la meno incurvata, concava (Fig. 203-3).

Parallelamente alle tre lenti convergenti ne stanno altre tre *divergenti*. La 1ª risulta limitata da due facce concave: si dirà *biconcava* (Fig. 204-1). La 2ª è limitata da una faccia concava e da una piana: si dirà *piano-concava* (Fig. 204-2). La 3ª è limitata da una faccia concava e da una

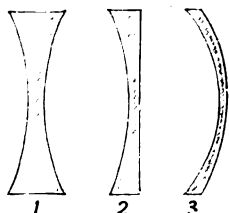



Fig. 204.

convessa, ma la concava è più incurvata della convessa: si dirà *menisco divergente* (Fig. 204-3).

La retta individuata dai centri di curvatura delle due facce di una lente si chiama *asse principale*.

Nello studio delle lenti supporremo che lo spessore loro sia sufficientemente piccolo, perchè possa venire trascurato (*lenti sottili*); ed inoltre che la lente riceva dei fasci luminosi poco inclinati sull'asse.

Rappresenteremo graficamente ogni lente mediante un segmento rettilineo pieno, mentre il contorno della sezione della lente verrà rappresentato con linea punteggiata. Per ogni lente si deve considerare (esternamente o internamente, a seconda della forma della lente) il cosidetto *centro ottico* C, che gode della proprietà che ogni raggio PQ, diretto in modo da passare per esso attraverso alla lente, non viene deviato.

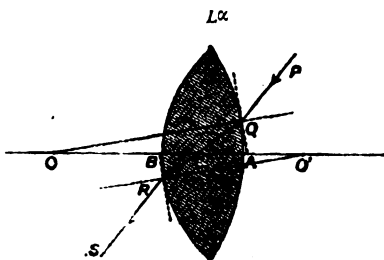
Fig. 205.

Siano O ed O' i centri di curvatura delle facce di una lente (Fig. 205). Consideriamo due punti Q ed R delle facce, tali che i piani tangenti, condotti per Q e per R, riescano paralleli fra loro: il raggio PQ entra nella lente, incontra l'asse principale in C, ed esce secondo una direzione RS parallela alla prima; quindi la lente si comporta per esso e relativamente al raggio come una lastra a facce parallele. Il punto C è il *centro ottico* della lente ed ha posizione fissa nella lente, poichè divide la OO' in parti che stanno fra loro come i raggi di curvatura della lente. Infatti uniamo Q con O ed R con O': le due rette OQ ed RO' risultano parallele, essendo perpendicolari ai piani tangenti in Q ed R, i quali sono, per costruzione, paralleli fra loro. I due triangoli OQC e $CO'R$ sono simili, quindi la retta OO' è divisa in parti proporzionali ai raggi di curvatura. Come PQ, ogni altro raggio che entra nella lente, passando pel centro ottico, esce parallelo, con spostamento tanto minore quanto più la lente è sottile. Per le lenti sottili si può ritenere che un raggio passante pel centro ottico continui nella sua direzione. Come tipo delle lenti convergenti considereremo la *biconvessa* e come tipo delle divergenti la *biconcava*. In esse il centro ottico è nel centro della massa costituente la lente.

Si dimostra che, se n_1 è l'indice assoluto di rifrazione del mezzo circostante alla lente, n_2 l'indice del materiale costituente questa, R_1 ed R_2 rappresentano i raggi di curvatura delle due facce della lente, p e p' le distanze dal centro ottico del punto luminoso e dell'immagine:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_1}{p'} = (n_2 - n_1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right). \qquad (46)$$

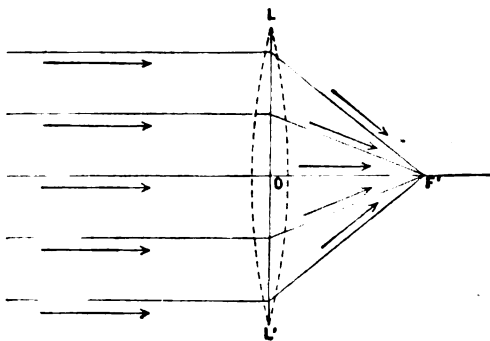
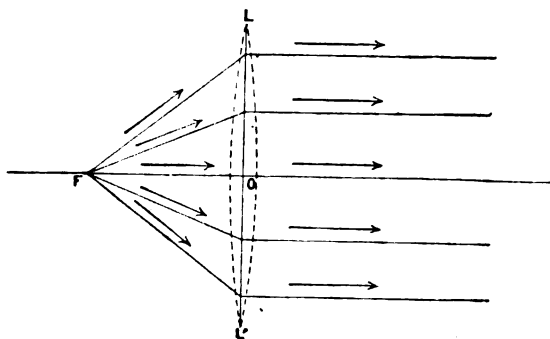
Vale la solita convenzione dei segni. Per R_1 come per R della (45); per R_2 all'opposto. Introducendo l'indice relativo $n = \frac{n_2}{n_1}$ la (46) diventa

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right). \qquad (47)$$

§ 189. **Prime nozioni sperimentali sulle lenti - Fuochi principali.** — 1. Come un fascio di raggi paralleli all'asse principale di uno specchio concavo di piccola apertura, investendo questo si riflette e dà origine al fuoco principale, situato dinanzi allo specchio medesimo, così un *fascio di raggi paralleli all'asse principale d'una lente convergente di piccola apertura si rifrange in modo da dare origine al di là della lente ad un punto luminoso reale, situato sull'asse.*

Evidentemente per ogni lente se ne hanno due di questi punti, uno per parte. Si chiamano *fuochi principali* ed hanno distanze uguali dal centro ottico o, ciò che praticamente equivale, dalla lente. Ognuna di tali distanze si chiama *distanza focale* e si suol rappresentare con *f*. Il piano passante pel fuoco e perpendicolare all' asse principale chiamasi *piano focale.*

Fig. 206.

2. Come un fascio di raggi paralleli all'asse principale di uno specchio convesso di piccola apertura, investendo questa si riflette in modo che i raggi riflessi assumono andamento divergente da un punto virtuale situato dietro allo specchio medesimo, così *un fascio di raggi paralleli all'asse principale di una lente divergente di piccola apertura si rifrange in modo da divergere da un punto situato sull'asse, dalla parte stessa donde vengono i raggi.*

Fig. 207.

Evidentemente per ogni lente se ne hanno due di tali punti: uno per parte. Si chiamano *fuochi principali*, hanno distanze uguali dal centro ottico, ma sono *virtuali*, non reali, cioè, come pel caso delle lenti convergenti. La distanza di un fuoco dal centro ottico o (ciò che praticamente è lo stesso) dalla lente chiamasi *distanza focale.* Il piano passante per il fuoco e perpendicolare all'asse principale chiamasi *piano focale.*

3. Una lente trasforma dunque un fascio parallelo in uno tanto più rapidamente convergente (caso delle lenti convergenti) o tanto più rapidamente divergente (caso delle lenti divergenti) quanto più piccola è la distanza focale. La convergenza delle lenti cresce quando la distanza focale diminuisce.

Si suol dire che una lente convergente è tanto più *potente* quanto più corta è la sua distanza focale.

4. Un fascio di luce parallela, che colpisca obliquamente una lente:

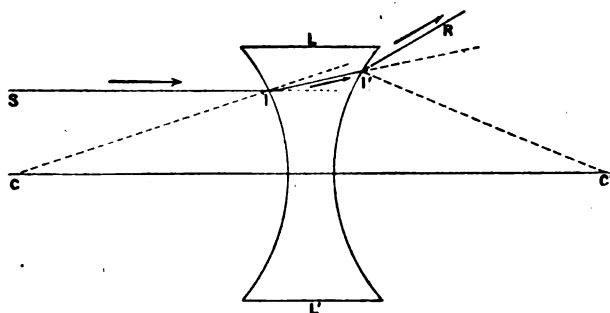



Fig. 208. - Come una lente divergente fa divergere un raggio luminoso *SI* che la investe.

a) converge dopo rifrazione in un punto *F*, situato sul piano focale, se la lente è biconvessa; *b*) sembra divergere dopo rifrazione da un punto F_1 situato sul piano focale, se la lente è biconcava.

La retta che congiunge F_1 con il centro ottico e che corrisponde alla retta, secondo la quale un raggio luminoso che la segue non viene deviato, dicesi *asse secondario.*

Fig. 209. - Il fuoco principale *F* di una lente divergente è virtuale, e situato nell'incontro dei prolungamenti dei raggi rifratti che corrispondono a raggi incidenti paralleli all'asse principale.

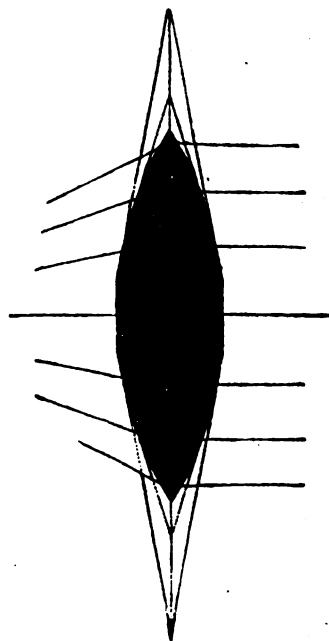



Fig. 210.

Fig. 211. - Il comportamento di una lente ce lo possiamo spiegare considerandolo costituito dalla successione di piccoli blocchi prismatici.

§ 190. **Costruzione delle immagini - Immagine di un punto.** — In base a quanto finora si è detto, riesce facile comprendere in qual modo possa aversi la posizione dell'immagine, data da una lente, d'un qualsiasi punto luminoso situato dinanzi ad essa (Fig. 210). Ci riferiremo ad una lente convergente, ma la cosa vale anche per le divergenti, e sia, per esempio, *L* il punto. Si considerino due raggi fra gli infiniti che partono da *L*, ma tali che si possano facilmente seguire nella rifrazione attraverso alle lenti. Saranno, per esempio, il raggio *LM*,

Fig. 212.

parallelo all'asse principale che andrà a passare per il fuoco F, ed il raggio LO, diretto verso il centro ottico, che proseguirà indisturbato nella primitiva direzione. In L', dove i due raggi s'incontrano, si ha l'immagine del punto L.

Come si costruisce l'immagine di un punto luminoso, si può costruire anche quella di un oggetto luminoso, prendendo in considerazione i punti caratteristici della superficie dell'oggetto medesimo.

Fig. 213.

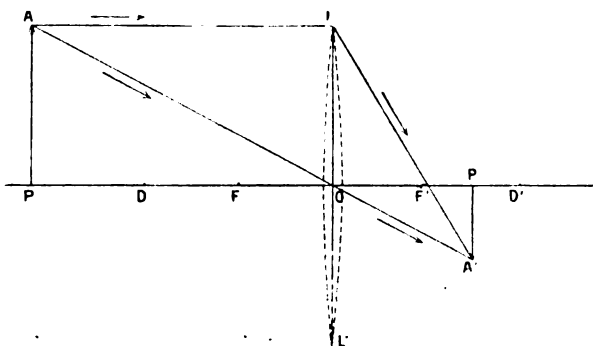
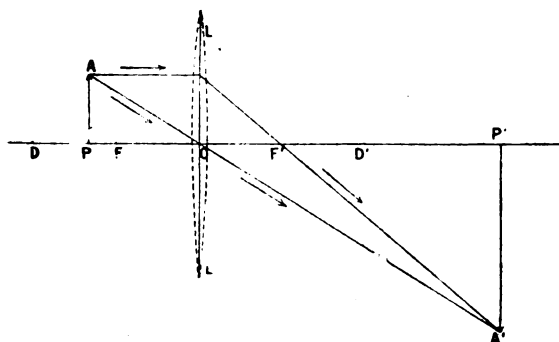
§ 191. **Immagini date dalle lenti convergenti.** — In base al metodo indicato per la costruzione grafica, si può vedere (graficamente) quanto segue:

1. Un oggetto che sia situato (Fig. 212) fra il doppio della distanza focale di una lente e l'infinito ha un'immagine, data dalla lente, reale, capovolta, situata dall'altra parte della lente fra il fuoco ed il doppio della distanza focale, più piccola dell'oggetto, e tanto più piccola e vicina al fuoco principale quanto più l'oggetto è lontano dalla lente.

Fig. 214.

2. Se l'oggetto passa per il punto situato ad una distanza doppia della focale, l'immagine che si ottiene, dall'altra parte, è ancora reale e capovolta, ma è uguale all'oggetto e passa per il punto situato ad una distanza pure doppia della focale.

3. Se l'oggetto (Fig. 213) si trova fra il doppio della distanza focale ed il fuoco, la lente dà una immagine reale, capovolta, situata

dall'altra parte della lente fra il doppio della distanza focale e l'infinito, più grande dell'oggetto e tanto più grande e lontana dalla lente quanto più l'oggetto è vicino al fuoco.

4. Se l'oggetto si trova (Fig. 214) fra il fuoco principale e la lente, si ha un'immagine virtuale, diritta, ingrandita dell'oggetto e situata dalla stessa parte rispetto alla lente.

Tutto questo può verificarsi sperimentalmente col solito sistema usato per gli specchi. È opportuno notare che:

1. Nella lente non hanno valore le posizioni dei centri di curvatura delle facce se non per definire l'asse principale. Per esse valgono invece due punti situati, come il centro di curvatura dello specchio, sull'asse principale, ad una distanza dalla lente doppia della distanza focale principale.

2. Le lenti convergenti si comportano come gli specchi concavi; salvo che gli specchi, riflettendo la luce, fanno avvenire dinanzi ad essi ciò che le lenti, lasciandosi attraversare dalla luce, fanno avvenire al di là di esse.

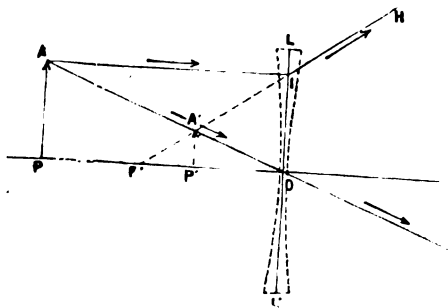



Fig. 215. - Ogni oggetto luminoso *AP* posto dinanzi ad una lente divergente dà una immagine *A'P'* virtuale, diritta, più piccola dell'oggetto, che sembra formarsi fra le lenti e il fuoco.

Circa la formazione di immagini virtuali, mentre gli specchi le producono dalla parte opposta a quella ove si trova l'oggetto, rispetto ad essi, le lenti le producono dalla stessa parte.

L'analogia fra gli specchi concavi e le lenti convergenti appare evidente da ciò: che nel caso delle lenti, la formola che ne rappresenta le proprietà, desumibile facilmente dalla (47), è la medesima di quella degli specchi:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}. \tag{48}$$

È facile anche vedere che l'ingrandimento

$$G = \frac{I}{O} \text{ è dato da } \frac{f}{p-f} = \frac{p'}{p}. \tag{49}$$

§ 192. **Immagini date dalle lenti divergenti.** — Per costruire l'immagine d'un punto A si devono (Fig. 215) condurre i raggi AO ed AI, che dal punto vanno rispettivamente al centro ottico e parallelamente all'asse principale, poi congiungere col fuoco principale il punto d'intersezione I del secondo raggio condotto, con la retta LL', assunta a rappresentare la lente. Là dove tale congiungente va ad incontrare il primo raggio AO, cioè sul punto A', si ha l'immagine cercata.

Per costruire l'immagine di un oggetto si considerano alcuni dei punti di questo e se ne costruiscono le immagini. Ciò in modo analogo a quello usato per gli specchi e per le lenti convergenti. Con la costruzione si può vedere che le lenti divergenti danno immagini virtuali e dirette degli oggetti luminosi. Queste immagini sono più piccole degli oggetti e si formano fra la lente ed il fuoco, dallo stesso lato dell'oggetto.

Non si possono dunque ricevere su di uno schermo, ma si vedono ponendo l'occhio dall'altro lato della lente.

Interessante è il caso considerato nella figura 216 della immagine di un oggetto virtuale fornita da una lente divergente.

Fig. 216. - Se la lente divergente riceve della luce convergente, che se fosse libera anderebbe a convergere al di là del fuoco *F*, l'immagine è virtuale e capovolta. Questo caso interessantissimo si applica nel cannocchiale di Galileo.

Osserviamo che le lenti divergenti si comportano in fondo come gli specchi convessi. Per esse vale la seguente formola desumibile dalla (47):

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}. \qquad (50)$$

L'ingrandimento G ha il valore:

$$G = \frac{I}{o} = \frac{p'}{p} = \frac{f - p'}{f} = \frac{f}{p + f}. \qquad (51)$$

§ 193. **Aberrazioni delle lenti.** — In pratica le lenti, che non possiedono mai quella piccola curvatura e quella sottigliezza supposte, presentano due principali difetti, detti *aberrazioni*.

1. Si chiama *aberrazione di sfericità* il difetto causato dal fatto che le lenti non hanno piccola apertura, e che quindi ad un punto non corrisponde come immagine un punto, bensì una piccola superficie. Per esso non si hanno immagini nette. Lo si attenua, ponendo dinanzi alla lente un diaframma forato, che dà adito ai soli raggi centrali.

Fig. 217. - Le lenti danno per il fenomeno della dispersione immagini più o meno colorate ai contorni. Ciò costituisce la cosidetta aberrazione di rifrangibilità. Per evitarla si formano sistemi convergenti o divergenti, detti acrobatici, coll'associare una lente convergente di vetro *crown* con una divergente di vetro *flint*.

Fig. 218. - Sezione di un sistema convergente ideato dal Fresnel per dirigere la luce delle lanterne dei fari. Si chiama lente a gradinata. Per essa è debole l'aberrazione di sfericità.

2. Poichè le lenti, oltre che rifrangere la luce, la disperdono (Fig. 211), le immagini da esse fornite sono di solito a contorno colorato. Questa aberrazione si dice di *cromaticità*. La si attenua, formando sistemi doppi di vetro differente. Questi sistemi si sogliono chiamare *lenti acromatiche* (Fig. 217).

§ 194. **Misure diottriche.** — Per certi usi della pratica le distanze inerenti alle lenti, come la distanza focale ecc., si valutano, dando l'inverso del numero che la misura in metri. Si dice che si dà la *misura diottrica* della lunghezza, o che si valuta la lunghezza in

diottrie. Così una lunghezza di 30 cm. equivale a diottrie $\frac{1}{0,30} = 3,3$; una lunghezza di due metri a 0,5 diottrie; una lunghezza di un metro a una diottria; una lunghezza di 50 cm. a due diottrie.

Per gli specchi e per le lenti è verificato il fatto che la somma delle distanze diottriche del punto luminoso e della sua immagine dal centro di figura dello specchio o dal centro ottico della lente, è uguale al valore diottrico della distanza focale: *potere diottrico.* Per le lenti, alle quali più specialmente si applica l'indicato sistema di misura, il valore diottrico della distanza focale, o potere diottrico, si chiama *numero* della lente.

Si dimostra che ponendo di seguito più lenti, in modo che i loro assi coincidano, l'insieme è equivalente ad un'unica lente, il cui numero si ottiene facendo la differenza fra la somma dei numeri delle lenti convergenti e quella dei numeri delle lenti divergenti.

CAPITOLO XX.

L'OCCHIO UMANO E LA VISIONE.

§ 195. **L'occhio e l'accomodazione.** — L'occhio è un globo formato di vari tessuti. Un primo, esterno, è, nella parte anteriore, sporgente trasparente: *cornea trasparente*, e nella parte posteriore opaco e bianco: *cornea opaca*; un secondo è nero: *coroide*; un terzo, che tappezza l'interno dell'occhio, è sensibile alla luce; si chiama *retina* ed è formato dalle terminazioni del nervo ottico che attraversa il bulbo oculare e che è destinato a trasmettere le sensazioni luminose al cervello. Nella retina vi è una regione particolarmente sensibile, di color giallo, chiamata *macchia gialla.* Dietro alla cornea trasparente è un diaframma colorato: *iride*, con un foro ad apertura variabile: *pupilla*; poi una lente biconvessa, chiamata *cristallino* e trattenuta dai muscoli ciliari.

Fig. 219.

a nervo ottico. *b* cornea opaca. *c* cornea trasparente. *d* coroide. *e* iride. *f* retina. *g* macchia gialla. *m* cristallino. *p* pupilla.

Nello spazio compreso fra la cornea trasparente ed il cristallino è contenuto un liquido: l'*umore acqueo*, e in quello compreso fra il cristallino e la retina un altro liquido, detto *umore vitreo.*

Se si prende un occhio di bue e se ne logora la parete posteriore in modo da renderla translucida, si vedono formarsi su di essa le immagini capovolte degli oggetti esterni. Analogo comportamento si nota nell'occhio umano, anche durante la visione, se si ricorre ad un qualche mezzo che consenta l'osservazione del suo interno. Si constata che se la persona della quale si osserva l'occhio vede nettamente un oggetto, l'immagine di questo, osservato sulla retina dell'occhio, è netta. Quando si fissa un corpo si dispongono gli occhi in modo da riceverne l'immagine sulle macchie gialle delle due retine.

Possiamo dunque ritenere, in modo molto approssimativo, che sotto

il punto di vista ottico, l'*occhio si comporti come una lente convergente, tale che le immagini da esse fornite degli oggetti esterni vadano a formarsi (per la visione netta) sopra un diaframma opportuno: la retina.* E poichè la visione si ha a distanze diverse degli oggetti dall'occhio, avverrà, in base al funzionamento a noi noto delle lenti, una delle cose seguenti: 1° il diaframma costituito dalla retina si sposta per raccogliere le immagini di oggetti posti a varia distanza; 2° la lente, alla quale in sostanza si riduce l'occhio, modifica la propria curvatura, in guisa che l'immagine dell'oggetto cada sempre sulla retina.

Esperienze numerose, eseguite in proposito, provano quest'ultimo fatto. L'operazione fisiologica cui è dovuta tale modificazione si chiama *accomodazione.* Potremo quindi aggiungere a quanto si disse più sopra sul comportamento ottico dell'occhio, che la lente, alla quale esso equivale, può subire a volontà variazioni di convergenza.

§ 196. **Occhio normale.** — La variazione di conseguenza in un occhio normale è compresa fra un valore massimo, che si ha allorquando non avviene alcun sforzo nell'occhio e questo vede nettamente gli oggetti situati a grande distanza, posti, come si dice, all'infinito; ed un valore minimo, che si ha allorchè l'occhio vede alla distanza più piccola possibile, che è di circa 25 cm. Quest'ultima distanza si suole chiamare *distanza minima* della visione distinta. I punti situati a distanze dall'occhio comprese fra 25 cm. e l'infinito, distanze fra le quali riesce possibile, mercè l'accomodazione, la visione dei corpi, ricevono la denominazione rispettivamente di *punto prossimo* e di *punto remoto.*

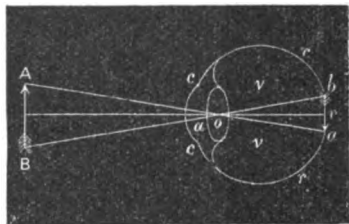



Fig. 220. - Formazione dell'immagine di un oggetto *AB* sulla retina.

§ 197. **L'occhio miope e l'occhio ipermétrope.** — Esistono occhi in certo senso difettosi, per i quali limiti di accomodazione sono diversi da quelli indicati. Sono l'occhio miope e l'occhio ipermétrope.

L'occhio *miope,* nel suo stato di riposo, equivale ad una lente troppo convergente, perchè l'immagine d'un corpo, situato a distanza infinitamente grande, si formi sulla retina; l'immagine va a formarsi invece sul davanti della retina, e perchè cada sulla retina l'oggetto deve trovarsi ad una distanza determinata, non infinitamente grande.

Conseguentemente, un occhio miope vede senza accomodazione oggetti vicini. La distanza minima della visione distinta può essere piccolissima per un miope e ridotta a 5 od 8 centimetri ed anche meno.

L'occhio *ipermétrope,* nel suo stato di riposo, equivale ad una lente troppo sottile, troppo poco convergente, perchè l'immagine di un oggetto, situato ad una distanza infinitamente grande, cada sulla retina: in questo caso l'immagine va a formarsi dietro alla retina.

Cosicchè l'occhio ipermétrope può vedere, senza sforzo d'accomodazione, sistemi luminosi definiti da raggi convergenti, quando questi raggi lo raggiungano prima di definire tali sistemi luminosi. Può vedere cioè degli oggetti virtuali situati al di dietro dell'occhio, epperò il punto remoto di questo può ritenersi posteriore all'occhio, ad una distanza tanto più piccola quanto più forte sia l'ipermétropia.

L'occhio ipermétrope deve subire una forte accomodazione anche per vedere oggetti lontanissimi. La distanza minima della visione distinta può raggiungere parecchi metri. Convenendo di rappresentare con numeri positivi le distanze contate davanti all'occhio e con numeri negativi quelle contate dietro, potremo dire che negli occhi miopi la distanza diottrica (inversa della distanza espressa in metri) del punto remoto è positiva, mentre negli occhi ipermétropi la distanza è negativa. Si capisce che per correggere la miopia occorrerà diminuire la convergenza dell'occhio, il che si otterrà associando a questo una lente divergente appropriata. Del pari per correggere l'ipermétropia occorrerà aumentare la convergenza dell'occhio, il che si otterrà associandogli una lente convergente opportuna. Da ciò l'uso degli *occhiali*.

Ci si può chiedere quale dev'essere il numero degli occhiali da porsi dinanzi agli occhi per correggerli. (Il *numero* è, come si è detto, la misura diottrica della distanza focale, delle lenti onde sono costituiti). Per saperlo occorre misurare la distanza diottrica del punto remoto dell'occhio in esame. Gli occhiali da usarsi (convergenti se gli occhi sono ipermétropi e divergenti se sono miopi) dovranno avere una potenza diottrica uguale alla distanza diottrica del punto remoto. Così un miope che abbia il punto remoto a m. 0,30, cioè a $+$ 3,3 diottrie (la diottria essendo la misura diottrica 1) richiede lenti ben divergenti di 3,3 diottrie. Ed un ipermétrope che veda senza sforzo di accomodazione un oggetto virtuale situato dietro l'occhio, alla distanza di 50 cm. ed abbia quindi il punto remoto alla distanza di 2 diottrie, dovrà usare occhiali convergenti di due diottrie.

§ 198. **Presbiopia.** — È un fatto da lungo tempo noto la diminuzione dell'ampiezza d'accomodazione coll'età, in conseguenza del fatto che gli organi capaci di far variare la curvatura del cristallino per l'accomodazione tendono ad atrofizzarsi. Ogni occhio normale, miope od ipermétrope può diventare presbite e lo diventa in generale sotto l'influenza dell'età. Si può dunque essere insieme miopi per la curvatura esagerata del cristallino e presbiti per la perdita della facoltà d'accomodazione. Si è verificata generalmente esatta la seguente relazione empirica fra la distanza del punto prossimo al punto remoto e l'età: Distanza $= 16 - 0,3\,x$ ($x =$ età).

L'ampiezza dell'accomodazione risulta da questa relazione nulla per l'età di 53 anni. E nella maggior parte degli individui normali è proprio intorno ai 53 o 55 anni che l'occhio si comporta come una lente ordinaria, così da non poter vedere, senza il sussidio di occhiali, se non gli oggetti che si trovano ad una determinata distanza. Gli occhiali poi non fanno che variare questa distanza. Ci vorranno occhiali di un certo numero per vedere gli oggetti alla distanza alla quale si trovano per le operazioni alle quali di solito si attende, ed occhiali di un numero diverso per veder lontano.

Sono attualmente in commercio degli occhiali, le cui lenti sono formate di due parti, una superiore, adatta per la visione a distanza, e l'altra inferiore, adatta per i lavori ordinari di lettura od altro. Posti sul naso consentono la visione attraverso alle parti inferiori delle loro lenti, quando il capo è chino per lavorare o leggere, mentre che offrono agli occhi le parti superiori delle lenti allorchè stando diritti, si guarda lontano.

L'occhio va soggetto ad illusioni varie, intorno alle quali non possiamo qui trattenerci.

§ 199. **Diametro apparente - Potere separatore dell'occhio.** — Si chiama diametro apparente di un oggetto AB l'angolo AOB, sotto il quale l'oggetto è visto dall'occhio O.

Si percepiranno tanto meglio i dettagli di un oggetto, quanto più grande sarà il suo diametro apparente, perchè tanto più grande sarà l'immagine che si formerà sulla retina. Questa condizione è soddisfatta quando l'oggetto o una immagine di esso dataci da uno strumento ottico sia alla distanza minima della visione distinta. Il più piccolo valore che può assumere il diametro apparente d'una dimensione lineare, affinchè i suoi estremi siano visti separatamente, caratterizza ciò che si chiama il *potere separatore dell'occhio*.

Fig. 221.

L'esperienza mostra che l'occhio separa due punti, la cui distanza corrisponde ad un diametro apparente di $1'$, cui corrisponde un'immagine di $4^{\mu},4$ circa, vale a dire di 4,4 millesimi di millimetro.

§ 200. **Visione binoculare.** — Sappiamo che in ogni occhio si forma un'immagine dell'oggetto guardato. Perchè mai questo oggetto non si vede doppio?

Problema analogo all'altro: Perchè mai toccando un corpo con due dita non ci apparisce affatto doppio e con dieci decuplo?

Per risolvere il problema basta guardare un oggetto e nel contempo premere con un dito su uno dei globi oculari; si vede subito doppio. Precisamente come apparisce doppio il nostro naso se ne mettiamo la punta fra gli estremi dell'indice e del medio di una mano incrociati.

Gli è che le nostre sensazioni sono frutto dell'abitudine e delle numerose osservazioni anteriori.

Una lunga serie di osservazioni ci ha insegnato che le impressioni tattili hanno certe posizioni corrispondenti nelle varie dita, l'oggetto toccato è unico, e quindi noi concludiamo che l'oggetto è unico, e percepiamo un'unica sensazione, quando le impressioni hanno tali posizioni corrispondenti. Del pari, una lunga serie di osservazioni ci ha insegnato che se le immagini di un oggetto ricevute dai due occhi hanno certe posizioni corrispondenti sulle due retine, l'oggetto osservato è unico; epperò noi concludiamo che l'oggetto è unico e percepiamo un'unica sensazione, quando le immagini hanno quelle posizioni corrispondenti.

Coll'incrociare l'indice ed il medio, col premere su uno dei bulbi oculari, turbiamo la corrispondenza indicata e quindi il naso toccato ci par doppio, e così pure l'oggetto guardato si vede doppio.

La esistenza in noi di due occhi giova a percezioni, per le quali un solo occhio sarebbe insufficiente.

Una è quella delle distanze e l'altra è quella del rilievo. L'apprezzamento delle distanze si trae inconsciamente dalla convergenza più o meno grande degli occhi rivolti all'oggetto guardato. Quello del rilievo dalla circostanza che le due immagini di un medesimo oggetto non sono del tutto identiche: l'occhio sinistro vede un poco più dalla parte sini-

stra e l'occhio destro un poco più dalla parte destra. Ciò perchè i due occhi non occupano la medesima posizione nello spazio.

Si può d'altronde ottenere artificialmente la sensazione del rilievo guardando, in modo da ricevere nei due occhi le immagini corrispondenti, due fotografie di un medesimo oggetto, prese da due punti di vista un poco discosti. Si può raggiungere l'intento in vari modi. Il più comune consiste nel servirsi di un apparecchio detto *stereoscopio*. Si compone di due mezze lenti convergenti, dinanzi alle quali sono disposte le due fotografie (prese da due punti distanti l'uno dall'altro di 7 cm. circa). Ogni occhio percepisce rispettivamente di ciascuna di esse una immagine virtuale. Le due immagini sono corrispondenti e diverse, come occorre per la percezione del rilievo.

Grazioso e semplice artificio di visione stereoscopica è quello di formare una figura rappresentativa della parte di un oggetto vista da entrambi gli occhi con continuazioni a sinistra ed a destra di ciò che rispettivamente è visto dal solo occhio sinistro e dal solo occhio destro; di colorare in rosso, ad esempio, regioni caratteristiche di ciò che deve esser veduto dall'occhio sinistro ed in verde regioni caratteristiche di ciò che dev'esser veduto dall'occhio destro; di guardare infine la figura con un occhiale, formato da vetro rosso nella parte adattabile all'occhio sinistro e da vetro verde nella parte adattabile all'occhio destro.

Ancor più bello è l'artificio detto di Ives, per cui su di un vetro vengono adattate, in condizioni di visibilità opportuna, le immagini fotografiche del corpo in rilievo, quali ci apparirebbero se l'oggetto fosse guardato attraverso ad un reticolo a fili paralleli dai due occhi. Le condizioni di visibilità opportune sono date dall'adattamento contro al vetro, di un reticolo, quale fu quello che servì a prendere con un obbiettivo doppio le fotografie, e dall'osservazione del sistema per trasparenza (Fig. 222 a 224).

§ 201. **Un altro problema inerente alla visione - Percezione dei colori.** — Le immagini si formano capovolte sulla retina: perchè vediamo i corpi diritti? Il problema in certo senso è ozioso. Stare ritto non significa altro che avere i piedi al suolo e la testa lontana da terra. Un uomo ci appare diritto quando l'immagine dei suoi piedi si trova più vicina a quella della Terra che non l'immagine della sua testa.

Quale è il meccanismo della percezione dei colori? Sono state emesse in proposito due teorie: una, la meglio accetta, è di Young (va sotto il nome di Helmoltz perchè questi la modificò) e l'altra di Hering. Secondo Young-Helmoltz in ogni terminazione della retina esisterebbero tre fibrille (nessuno però le ha mai potute vedere neppure coi più potenti microscopi) il cui eccitamento produrrebbe rispettivamente la sensazione delle tre luci fondamentali (rosso-aranciata, verde e violetta).

Secondo Hering esisterebbero nella retina tre sostanze (da nessuno mai trovate) sulle quali le diverse qualità di luce eserciterebbero azioni differenti. La sostanza del rosso-verde verrebbe scomposta dal rosso e ricomposta dal verde, ed analogamente le sostanze del giallo-azzurro e del bianco-nero. Dalle diverse combinazioni di queste scomposizioni e ricombinazioni si potrebbero avere tutti gli effetti di luce colorata, precisamente come questo risultato si otterrebbe dalla combinazione di vari gradi di eccitamento delle fibrille Young-Helmoltz.

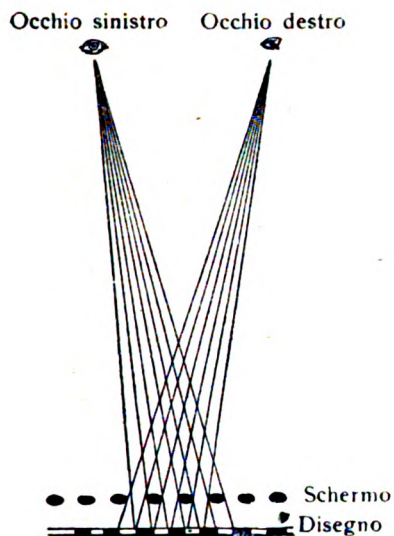



Fig. 222. - Come avviene la visibilità per parte dei due occhi attraverso allo schermo.

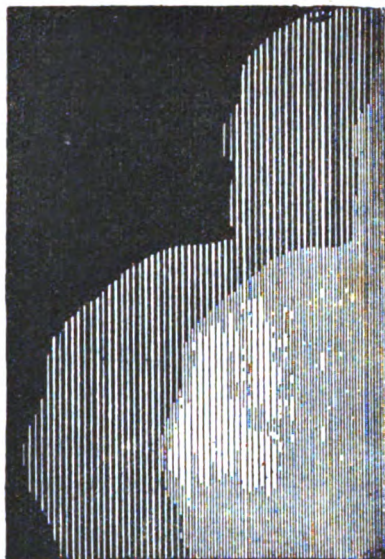



Fig. 224. - Porzione ingrandita della Fig. 223. Si vedono meglio le due parti che corrispondono alla visione separata dei due occhi.

Fig. 223. - Come apparisce una veduta stereoscopica Ives non guardata dalla posizione conveniente. Vi appariscono bene due parti spettanti per la visibilità ai due occhi separatamente.

I vari fenomeni inerenti alla percezione dei colori (distinzione delle varie luci colorate, fenomeni di abbagliamento, contrasti) e le anomalie (daltonismo o percezione errata dei colori per insensibilità parziale o totale a certe luci colorate) si spiegano con entrambe le teorie, ma più semplicemente colla teoria Young-Helmoltz.

CAPITOLO XXI.

STRUMENTI OTTICI.

§ 202. **Strumenti ottici.** — Si chiamano *strumenti ottici* dei sistemi formati da mezzi rifrangenti o da superfici riflettenti, disposti in modo da cambiare la direzione o la convergenza dei fasci luminosi. Il loro fine è, o di rimediare a difetti di accomodazione degli occhi (occhiali) o di sostituire agli oggetti le loro immagini reali o virtuali, in condizioni più favorevoli per la visione che non gli oggetti stessi.

Si sogliono distinguere, per la costituzione loro più o meno complessa, in *semplici* ed in *composti*. I *semplici* sono generalmente costituiti da una lente o da uno specchio o da un qualche cosa che loro equivalga. I *composti* sono formati da due parti essenziali: *obbiettivo*, specchio o lente o sistema di lenti, che dà (in un piano coniugato di quello dell'oggetto) un'immagine reale e capovolta, ed *oculare*, destinato ad ingrandire questa immagine, formandone un'altra virtuale, diritta o capovolta. Un oculare può evidentemente funzionare da solo nell'osservazione d'un oggetto, anzichè d'una immagine reale.

A seconda dell'uso al quale sono destinati gli strumenti ottici, si sogliono classificare in *microscopi, telescopi, strumenti di proiezione* ecc.

§ 203. **Ingrandimento - Potenza.** — Chiameremo *ingrandimento* d'uno strumento ottico, che fornisca d'un oggetto un'immagine reale (come immagine definitiva) accessibile e misurabile, il rapporto fra la grandezza dell'immagine e quella dell'oggetto. Corrisponde all'ingrandimento lineare G di cui si parlò già.

Si chiama ingrandimento di uno strumento ottico che fornisca una immagine virtuale (richiedente quindi, per la sua formazione l'occhio d'un osservatore) il rapporto fra i diametri apparenti, sotto cui si vedono l'immagine e l'oggetto, situati entrambi alla distanza minima della visione distinta. Tale rapporto equivale a quello delle dimensioni delle immagini che si formano nella retina in corrispondenza delle due osservazioni.

Si chiama *potenza* d'uno strumento, l'angolo sotto cui si vede nello strumento un oggetto lineare uguale all'unità.

Un oggetto di lunghezza l, visto attraverso ad uno strumento di potenza P, viene osservato sotto un diametro apparente uguale a Pl. Se δ è la distanza minima della visione distinta, l'oggetto sarebbe visto ad occhio nudo ed a tale distanza sotto un diametro apparente $\frac{l}{\delta}$. L'ingrandimento sarà quindi:

$$i = \frac{Pl}{\frac{l}{\delta}} = P\delta. \qquad (52)$$

Esso è dunque il rapporto fra P ed $\frac{1}{\delta}$, cioè fra la potenza dello strumento e quella dell'occhio. Varia quindi coll'osservatore e non può caratterizzare il valore di uno strumento. È più grande per un occhio presbite che non per uno normale e conseguentemente per uno miope.

MICROSCOPI.

§ 204. **Definizione.** — I microscopi sono strumenti che hanno per fine di fornire immagini convenientemente grandi di oggetti, che per le loro piccole dimensioni non sono sufficientemente osservabili ad occhio nudo.

§ 205. **Lente d'ingrandimento e microscopio semplice.** — L'ordinaria lente d' ingrandimento (Fig. 226), è una lente convergente a corto fuoco, che si pone (Fig. 225) fra l'occhio e l'oggetto

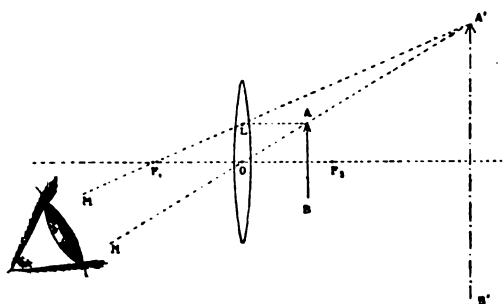



Fig. 225. - L'azione di una lente convergente.

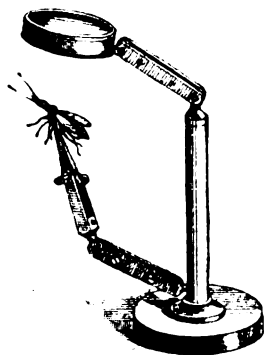



Fig. 226.

del quale si vogliono conoscere i dettagli, per modo che l'oggetto si trovi fra il fuoco e la lente. Dell'oggetto si ha così un'immagine virtuale, diritta, ingrandita.

Si ha un evidente vantaggio a servirsi della lente, poichè si sostituisce con ciò all'osservazione dell' oggetto AB (che posto alla distanza δ della visione distinta si vedrebbe sotto l' angolo $\frac{AB}{\delta}$), l' osservazione dell' immagine $A'B'$, che, posta alla medesima distanza δ, è veduta sotto l'angolo $\frac{A'B'}{\delta}$. E siccome $A'B' > AB$, si ha: $\frac{A'B'}{\delta} > \frac{AB}{\delta}$.

L' oggetto è quindi veduto sotto un angolo più grande che non ad occhio nudo.

Fig. 227.

La potenza di una lente definita nel § 203 risulta dipendente dalle condizioni dell'occhio osservatore. Si considera una potenza (detta *nominale*) di pochissimo differente da quella e dipendente solo dalla lente e definendola come l'angolo sotto cui si vede un oggetto lineare di lunghezza unitaria quando l'occhio sia nel fuoco F_1. Riferendoci alla Fig. 225, si vede che, ha per valore $\frac{2A'F_1O}{l}$, ossia (per essere sensibilmente $l = f_1 2A'F_1O$

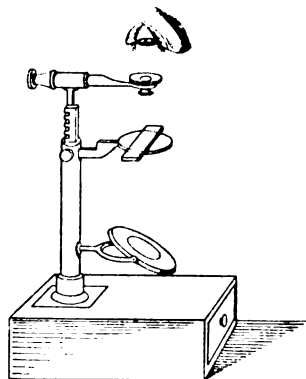
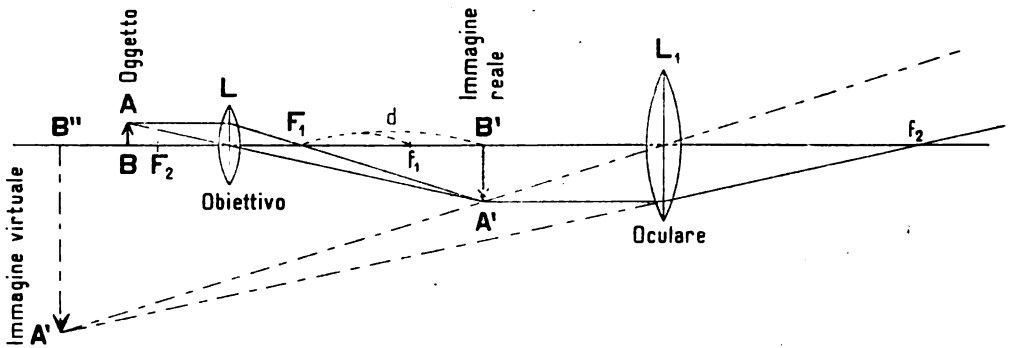



Fig. 228. - Il comportamento del microscopio composto. Sebbene non apparisca (per chiarezza di rappresentazione) dalla figura, le distanze focali delle due lenti sono piccole rispetto alla distanza di queste e l'immagine reale $A'B'$ è vicinissima ad F_1.

giacchè $AB = l = 2LO = f_1 2A'F_1O) \frac{1}{f}$ · Considerando come equivalente a P tale potenza nominale, l'ingrandimento $P\delta$ potrà anche scriversi $\frac{\delta}{f}$:

Con una montatura speciale della lente d'ingrandimento si ha (Fig. 227) il cosidetto *microscopio semplice*, che serve alle osservazioni di piccoli oggetti opportunamente preparati. In esso si nota un piatto porta-oggetti, munito di foro centrale che lascia passare i raggi inviati per riflessione da uno specchio sottostante e concentrantisi (allo scopo di bene illuminarlo) sull'oggetto da osservare, che sta sul piatto e che è preparato in un sottile strato su d'una lastra di vetro. La lente può spostarsi mediante una vite, onde poterla porre alla distanza voluta dall'oggetto, che rimane fisso sul porta-oggetti.

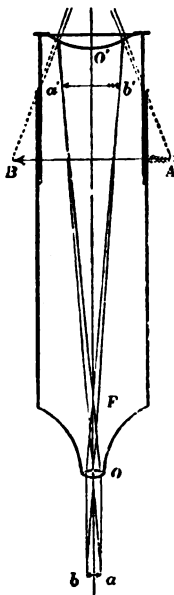
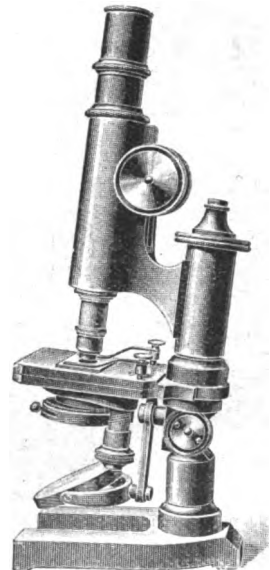



Fig. 229.

§ 206. Microscopio composto.

— Il *microscopio composto* serve a guardare piccolissimi oggetti, dei quali dà immagini ingrandite a volontà (Fig. 228 a 231).

Fig. 230.

Si compone di due gruppi di lenti convergenti, ciascuno dei quali si comporta (e tale può quindi rappresentarsi) come una lente. Uno è l'*obbiettivo*, così chiamato perchè si pone verso l'oggetto; è fortemente convergente e la sua distanza focale è molto piccola. L'altro è l'*oculare*, verso cui si pone l'occhio osservatore; è meno convergente dell'altro e la sua distanza focale è di qualche centimetro.

L'oculare e l'obbiettivo sono fissati all'estremo di un tubo (*corpo del microscopio*), che può scorrere entro una guida cilindrica, alla quale una vite permette di dare piccoli spostamenti, indi spostamenti più grandi, ottenuti facendo scorrere a mano il corpo del microscopio entro la guida.

L'oggetto, in generale di spessore piccolissimo, viene preparato su di una lastrina di vetro e così posto sul piatto porta-oggetti, in corrispondenza al foro circolare di questo. Se è trasparente viene illuminato con uno specchio concavo, che concentra su di esso, attraverso l'apertura del piatto, la luce diffusa delle nubi o quella di una lampada. Se è opaco lo si illumina dalla parte superiore, per mezzo d'una lente convergente, posta lateralmente.

Per l'osservazione bisogna mettere l'istrumento a fuoco, ed a tal fine, rimanendo l'oggetto fermo sul piatto, si sposta dinanzi ad esso il corpo del microscopio, dapprima con grandi movimenti a mano, poi con piccoli spostamenti mediante la vite, fino ad ottenere che l'oggetto sia oltre il fuoco dell'obbiettivo, ma da esso poco discosto.

L'obbiettivo dà dell'oggetto un'immagine reale, capovolta ed ingrandita, dalla quale poi l'oculare dà un'immagine diritta, virtuale ed ingrandita.

L'immagine ultima fornita dal microscopio composto è dunque capovolta rispetto all'oggetto, ciò che non reca disturbo, in quanto col microscopio non si vuol conoscere la figura complessiva dei corpi osservati e la disposizione loro rispetto ad altri, ma si vogliono osservare piccoli corpi o minuti dettagli.

Fig. 231. - Microscopio a *revolver* nel quale è facile la sostituzione di un sistema obbiettivo ad un altro.

§ 207. **Potenza ed ingrandimento del microscopio.** — Per calcolare la potenza, notiamo che se g_{ob} rappresenta l'ingrandimento lineare dell'obbiettivo, la grandezza dell'immagine obbiettiva dell'oggetto AB è $g_{ob} . AB$.

Conseguentemente: se p rappresenta la potenza dell'oculare, l'angolo sotto il quale si vede tale immagine è $g_{ob} . AB . p_{oc}$.

La potenza P del microscopio è dunque

$$\frac{g_{ob} \cdot AB \cdot p_{oc}}{AB} = g_{ob} \cdot p_{oc}; \qquad (53)$$

cioè *la potenza del microscopio è misurata dal prodotto dell'ingrandimento dell'obbiettivo per la potenza dell'oculare.*

Ma designando con d la distanza dei due fuochi F_1 ed f_1, (sensibilmente uguale ad $F_1 B'$ per le condizioni dell'osservazione) si ha, considerando i triangoli $F_1 L$ (O è il centro ottico dell'obbiettivo non segnato in figura) O ed $F_1 f_1 A'$:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{d}{F},$$

e quindi si può ritenere che l'ingrandimento dell'obbiettivo i_{ob} sia dato da $\frac{d}{F}$. Essendo poi $\frac{1}{F}$ la potenza dell'obbiettivo p_{ob}, si può scrivere: $P = d \cdot p_{ob} \cdot p_{oc}$. E si può anche dire che *la potenza* del microscopio è data dalla distanza del fuoco immagine dell'obbiettivo al fuoco immagine dell'oculare, moltiplicata per la potenza dell'obbiettivo e per la potenza dell'oculare.

Si suole anche dire che è data dal prodotto della lunghezza dell'istrumento moltiplicata per la potenza dell'obbiettivo e per la potenza dell'oculare, giacchè, per essere f ed F piccoli rispetto alla lunghezza dello strumento, questa differisce di pochissimo da d. Si potrà dunque modificare la potenza di un microscopio munendolo di obbiettivi e di oculari di ricambio, ed anche coll'uso di un corpo dell'apparecchio costruito in guisa da variare la distanza fra obbiettivo ed oculare. Ricordando poi la formola $i = P\delta$ del § 203, si potrà scrivere:

$$i = i_{ob} p_{oc} \delta$$

e quindi anche, per essere $i_{oc} = p_{oc} \delta$,

$$i = i_{ob} \cdot i_{oc}. \qquad (54)$$

L'ingrandimento è misurato dal prodotto dell'ingrandimento dell'obbiettivo per l'ingrandimento dell'oculare.

I più potenti microscopi attualmente costruiti raggiungono 12000 *diottrie* come potenza. Prendendo come valore del minimo di visione distinta $\delta = 20$ cm., il loro ingrandimento raggiunge un valore pari a $12000 \times 0,20 = 2400$.

Potere separatore o *potere di definizione del microscopio* è la più piccola distanza che il microscopio permette di scorgere. Per i migliori microscopi è prossima a $0^{\mu},1$.

L'ultra-microscopio. — Con un microscopio anche di costruzione perfettissima, non si può sperare di vedere corpi illuminati per trasparenza quando questi hanno dimensioni inferiori a circa un quarto di millesimo di millimetro e ciò per un fenomeno detto di diffrazione (§ 327).

Corpi aventi dimensioni inferiori al quarto di millesimo di millimetro si dicono *ultra-microscopici*, perchè, se illuminati per trasparenza, non sono più visibili al microscopio.

La presenza dei corpi ultra-microscopici può essere però constatata col microscopio, senza che tuttavia se ne possano discernere le forme, illuminandoli intensamente, mediante artifici che lasciano oscuro il mezzo circostante. Una stella è percepita soltanto se è più brillante del fondo dell'atmosfera, e tanto più, quanto più è brillante rispetto al fondo.

Siedentopf e Zsigmondy pensarono di illuminare lateralmente la preparazione ultra-microscopica da osservare, realizzando un *ultra-microscopio* (microscopio, coll'apparecchio conveniente di illuminazione laterale). Le figure 232 e 233 rappresentano l'ultra-microscopio e il sistema da adattarsi sul piatto del microscopio su cui trovasi la preparazione ultra-microscopica. Il risultato più notevole della osservazione ultra-microscopica è stato quello riguardante il *moto browniano* nei colloidi.

Fig. 232. - Ultra-microscopio. Un buon microscopio colla preparazione ultra-microscopica *S*, con una lampada *M* e con un sistema ottico *PR* per guidare e concentrare la luce sulla preparazione.

Fin dal 1825, subito dopo che coll'impiego di obbiettivi acromatici fu aumentato di molto il potere separatore del microscopio, il biologo Brown segnalava il fatto che polveri piccolissime, in sospensione nell'acqua, sono animate da movimenti rapidi del tutto irregolari. Siffatto movimento, detto subito browniano, fu poi in progresso di tempo sempre meglio visibile, benissimo visibile nelle soluzioni colloidali mediante l'ultra-microscopio. Più di sessant'anni dopo l'osservazione di Brown, il Gouy prese il movimento come oggetto particolare di studio e avanzò questa geniale affermazione: che esso ci dava i migliori insegnamenti sulla struttura della materia, in quanto tal moto sarebbe una eco della agitazione molecolare. Analoga idea aveva avuta anche il nostro Cantoni, e non è male ricordarlo, ora che tutti lo dimenticano. L'ipotesi del Gouy sorse in opposizione con quella di Exner, che attribuiva il movimento a correnti termiche

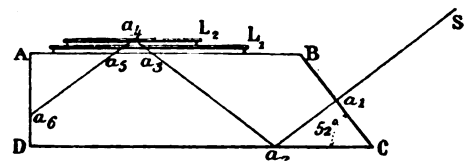



Fig. 233. - Lastra di vetro sopportante la preparazione da osservare interposta fra la lamina L_1 ed il vetro copri-oggetti L_2. Cammino di un fascio di luce che va ad investire le particelle della preparazione.

dovute alla illuminazione della preparazione, e con quella di Quincke che faceva intervenire effetti di capillarità, e si mostrò subito oltremodo più feconda e meglio rispondente ai fatti.

Perrin è giunto infine sperimentalmente a varie conclusioni, derivate da quella ipotesi. Così con granuli sferici di gomma gutta, ha messo in rilievo la conclusione relativa alla distribuzione di grani identici in funzione dell'altezza, e consistente in ciò: che questi si addensano variamente, ma ordinatamente, dall'alto al basso, come un gas perfetto sotto l'azione della gravità. Uguale risultato ha raggiunto con granuli di mastice, ottenuti precipitando con acqua la soluzione alcoolica di questa resina, ciò che dà un'emulsione bianca, formata di granuli perfettamente sferici (Fig. 234 e 235).

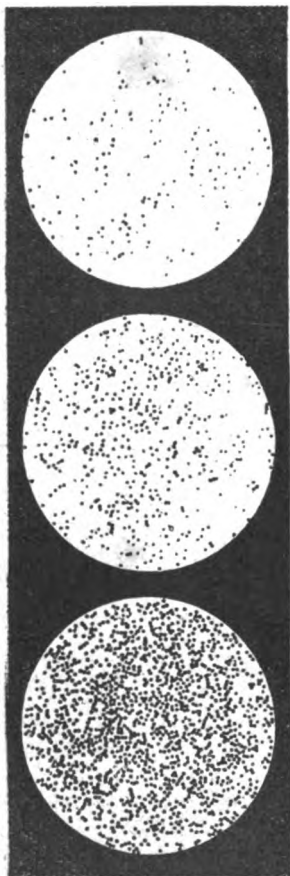



Fig. 234. - Ripartizione a varia altezza di una emulsione di mastice di 1^{μ} di diametro. Tre livelli presi di 12 in 12^{μ}. (Da osservazioni del fisico francese Perrin).

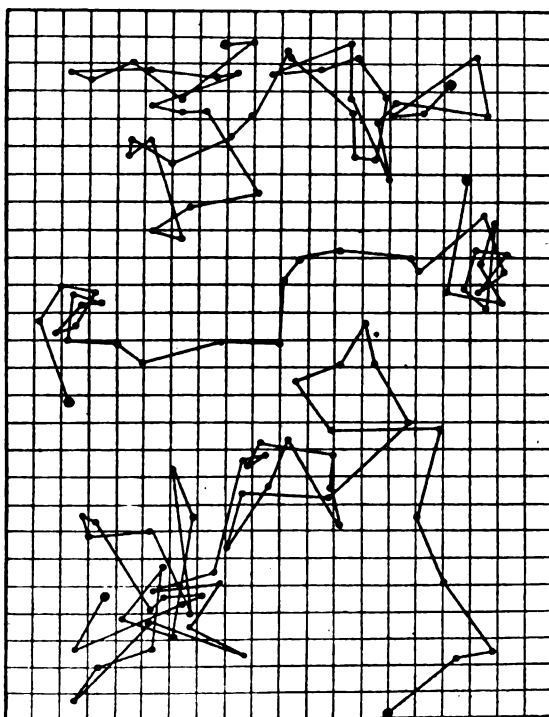



Fig. 235. - Come si muovono le particelle colloidali. Tre disegni ottenuti tracciando i segmenti che congiungono le posizioni consecutive di un medesimo grano di mastice a 30 secondi di intervallo. (Da osservazioni del fisico francese Perrin).

TELESCOPI.

§ 208. **Definizione e classificazione.** — Si designano sotto la denominazione generale di *telescopi* gli strumenti ottici che servono ad esaminare oggetti situati lontano e tali che la distanza dell'oggetto dall'istrumento non possa variare.

Si distinguono in *diottrici* e *catottrici*, a seconda che nella loro costituzione entrano soltanto lenti o lenti e specchi. Va però notato che comunemente si designano i primi con la denominazione di *cannocchiali* e gli altri con la denominazione di *telescopi*.

§ 209. **Cannocchiale astronomico.** — Il *cannocchiale astronomico* (Fig. 236) è destinato alla osservazione di oggetti lontanissimi come i celesti. Comprende: 1° un obbiettivo, formato da una lente convergente di grande superficie e di grande distanza focale; 2° un oculare convergente, molto più piccolo, formato in generale da un sistema di più lenti e la cui distanza focale è piuttosto piccola.

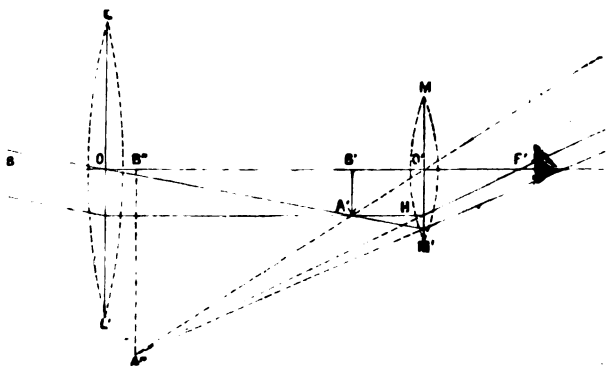



Fig. 236. - La formazione delle immagini in un cannocchiale astronomico.

L'obbiettivo è fissato (Fig. 237) all'estremo di un grosso tubo esterno e l'oculare è posto in un tubo di piccolo diametro che può scorrere entro il grosso tubo attraverso all'altro estremo.

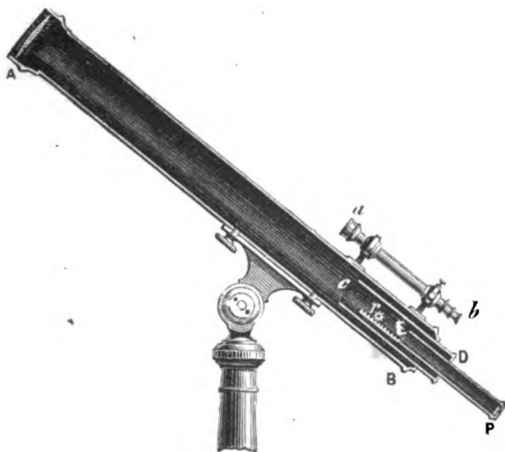



Fig. 237. - Spaccato di un cannocchiale astronomico. In *ab* un piccolo cannocchiale a debole ingrandimento detto cercatore per la ricerca della direzione da dare all'istrumento.

L'obbiettivo LL' dà allo oggetto una piccola immagine reale $A'B'$ capovolta, tra l'oculare ed il suo fuoco a piccolissima distanza da questo.

L'oculare MM' forma dell'immagine che è a piccolissima distanza anche dal suo fuoco, un' immagine virtuale notevolmente ingrandita e diritta $A''B''$. *Col cannocchiale astronomico quindi si vedono capovolti gli oggetti* che si guardano. Per vederli distintamente si mette a fuoco l'apparecchio, facendo scorrere il piccolo tubo sopportante l'oculare entro il grande, fino a raggiungere l'intento. Lo scorrimento si opera mediante una piccola ruota dentata, mobile mediante un bottone esterno.

Va tenuto presente che quando il cannocchiale è messo a fuoco, i due fuochi dell'obbiettivo e dell'oculare si confondono sensibilmente.

Ingrandimento. — Il diametro apparente dell'oggetto veduto col cannocchiale è l'angolo $A''O''B''$, che è uguale ad $A'O'B'$ ed ha per

misura $\frac{A'B'}{O'B'}$ e sensibilmente $\frac{A'B'}{f}$ (f è la distanza focale dell'oculare). Il diametro apparente dell'oggetto veduto ad occhio nudo è l'angolo $A'OB'$, che ha per misura $\frac{A'B'}{OB'}$ o sensibilmente $\frac{A'B'}{F}$ (F è la distanza focale dell'obbiettivo). L'ingrandimento ha dunque per espressione

$$i = \frac{\frac{A'B'}{f}}{\frac{A'B'}{F}} = \frac{F}{f} = Fp, \qquad (55)$$

ove p è la potenza dell'oculare.

Quindi *nel cannocchiale astronomico l'ingrandimento è uguale al prodotto della distanza focale dell'obbiettivo per la potenza dell'oculare*, o, in altre parole, *l'ingrandimento è uguale in valore assoluto al rapporto delle lunghezze focali dell'obbiettivo e dell'oculare*. Si usano negli osservatorî dei cannocchiali che ingrandiscono 1000 volte e più.

§ 210. **Cannocchiale terrestre.** — Le immagini date dal cannocchiale astronomico, sono, come abbiam detto, capovolte. Ciò non presenta inconvenienti per la visione degli astri, ma è incomodo per la

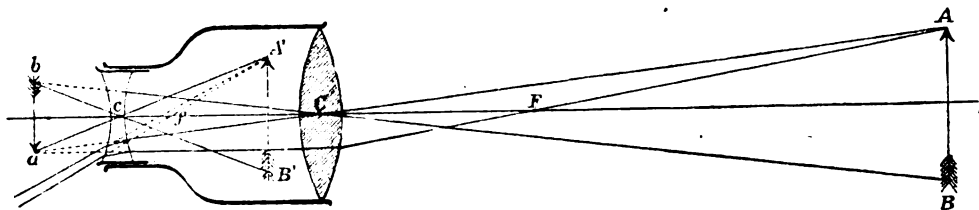



Fig. 238. - La formazione delle immagini nel cannocchiale di Galileo.

visione degli oggetti terrestri. Nel *cannocchiale terrestre* (che deve servire appunto alla visione di corpi lontani situati nella superficie del globo) l'immagine capovolta $A'B'$, formata da una prima lente convergente, dev'essere osservata con un piccolo microscopio, invece che con una semplice lente. Questo microscopio dà un'immagine capovolta di $A'B'$ e quindi diritta rispetto ad AB.

Si usa anche collocare fra l'obbiettivo e l'oculare d'un cannocchiale astronomico altre due lenti le quali hanno per ufficio di rovesciare l'immagine reale prodotta dall'obbiettivo, e quindi di raddrizzarla rispetto all'oggetto.

§ 211. **Cannocchiale di Galileo e binoccolo da teatro.** — Si ottiene pure l'osservazione diritta dell'immagine d'un oggetto, senza interporre lenti supplementari, impiegando semplicemente, una lente divergente. È questo l'artificio usato nel *cannocchiale di Galileo*. Senza codesta lente divergente l'obbiettivo C darebbe dell'oggetto AB una immagine reale ab capovolta e più piccola dell'oggetto, ma i raggi convergenti, i quali tendono a formare tale immagine incontrano invece nel loro cammino la lente divergente c, per cui nuovamente si rifrangono e divengono diver-

genti, formano una immagine $A'B'$ rovesciata, relativamente a quella che sarebbe prodotta dall'obbiettivo e perciò diritta rispetto all'oggetto.

Deve notarsi che con questo cannocchiale di Galileo si evita la perdita di luce dovuta alle due lenti ausiliarie del cannocchiale terrestre, e si dispone d'uno strumento di lunghezza relativamente breve, perchè la distanza dell'obbiettivo dall'oculare è uguale alla differenza fra le loro distanze focali.

Il cannocchiale di Galileo ha un potere d'ingrandimento uguale al rapporto delle distanze focali dall'obbiettivo e dall'oculare. In pratica questo ingrandimento sorpassa raramente il valore 5. Con due cannocchiali di Galileo, impiegati uno per ciascun occhio si formano i binoccoli da teatro.

§ 212. **Cannocchiali a prismi del Porro.** — È il cannocchiale terrestre a prismi, ora tanto largamente usato, sotto denominazioni di case tedesche costruttrici, sebbene ideato nel 1850 da un maggiore piemontese del genio, il Porro. In esso il raddrizzamento dell'immagine reale fornita dall'obbiettivo è ottenuta per mezzo di due prismi di vetro rettangoli ed isosceli A e B (Fig. 239) disposti coi piani delle facce ipotenuse paralleli e cogli spigoli degli angoli retti fra loro perpendicolari. La disposizione loro però è tale che le facce ipotenuse siano fra loro di fronte soltanto per metà e quindi è possibile la successiva riflessione dei raggi luminosi sulle diverse facce cateto. È facile persuadersi dell'effetto indicato, ottenibile coi due prismi. Ed è altrettanto facile comprendere come il dispositivo del Porro consenta una riduzione notevole dell'asse geometrico del cannocchiale (la diminuzione è di circa due volte la distanza dei prismi) senza diminuire la lunghezza dell'asse ottico. Nel caso abituale si usano due cannocchiali del Porro associati al binoccolo.

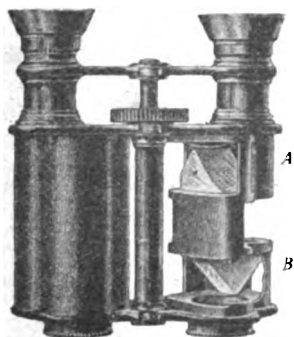
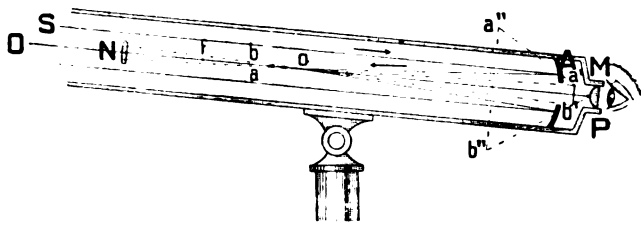



Fig. 239.

Fig. 240.

Fig. 241.

§ 213. **Telescopi catottrici.** — *Telescopi di Gregory.* — Il primo telescopio catottrico, fu immaginato nel 1663 dal Gregory. Esso consta di un lungo tubo di ottone, nel fondo del quale è collocato un grande specchio metallico M (Fig. 241) munito nel centro di un'apertura circolare, contro cui, a conveniente distanza, trovasi l'ocu-

lare *MP*. Vicino all'estremità aperta del tubo trovasi un piccolo specchio concavo *N* con l'asse coincidente col primo e distante dal fuoco di questo d'una quantità poco maggiore della sua distanza focale. L'immagine reale e capovolta, data dallo specchio principale, viene a formarsi di fronte al piccolo specchio in una posizione tale, che questo ultimo viene a dare di essa una nuova immagine reale ed ingrandita fra la lente oculare ed il fuoco principale di questa. La nuova immagine, capovolta rispetto alla precedente e diritta rispetto all'oggetto, viene osservata attraverso all'oculare in un'ultima immagine virtuale $a''b''$ diritta ed ingrandita.

Telescopio di Newton. — Il telescopio di Newton differisce da quello descritto per non avere l'apertura centrale nello specchio grande, e per essere lo specchio piccolo, piano e inclinato a 45 gradi verso l'asse dell'oculare (ad esso può sostituirsi un prisma a riflessione totale) il quale è posto sul lato del tubo del telescopio. Lo specchio piano fa sì che l'immagine, data da quello curvo, vada a formarsi nella posizione conveniente perchè sia osservata dall'oculare.

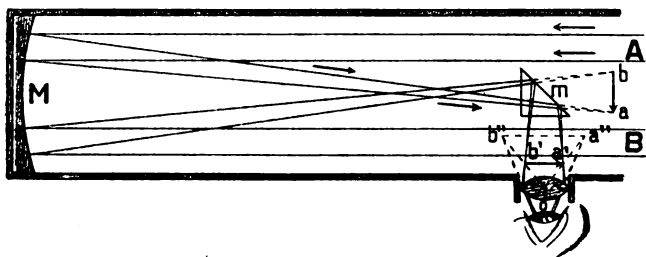



Fig. 242.

Telescopio di Herschell. — Nel telescopio di Herschell manca il piccolo specchio, e il grande ha il suo asse inclinato rispetto a quello del tubo, e perciò l'immagine data dallo specchio si forma obliquamente in prossimità dell'orlo del tubo. Così può osservarsi direttamente con l'oculare, onde avere qualche vantaggio di chiarezza. La difficile costruzione degli specchi metallici fece un tempo abbandonare l'uso dei telescopi catottrici. Li richiamò in uso il Foucault rendendo meno difficile e meno dispendiosa la costruzione di tali istrumenti col sostituire allo specchio metallico uno specchio di vetro, inargentato nella sua superficie.

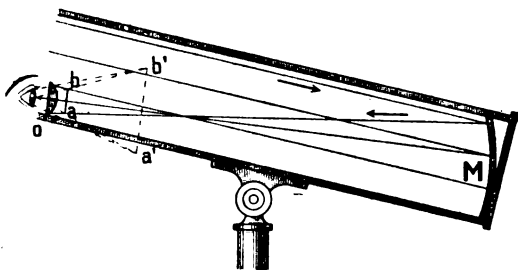



Fig. 243.

Adesso però si usano più largamente gli strumenti diottrici.

Altri strumenti ottici.

§ 214. **Camera lucida - Apparecchio di proiezione - Macchina fotografica - Cinematografo.** — Sono strumenti ottici di uso corrente, oltre a tanti altri che per brevità non indicheremo, la camera lucida; l'apparecchio di proiezione, riducentesi in sostanza ad

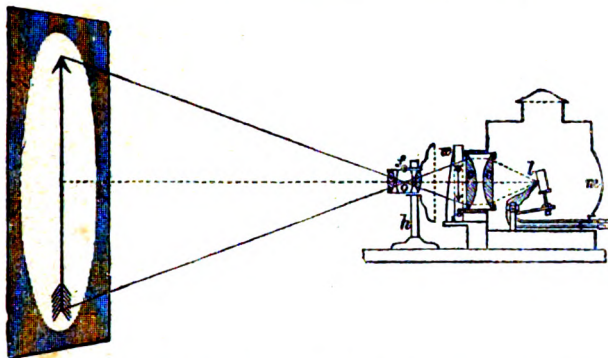



Fig. 244. - Spaccato di una lanterna di proiezione colla indicazione del giuoco di formazione delle immagini. In *l* sorgente luminosa di cui si concentrano colle lenti *v v* i raggi sull'oggetto *w* da proiettare. In *h* sistema convergente che serve ad operare la proiezione.

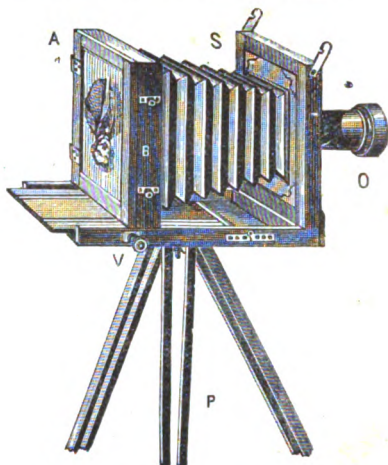



Fig. 246. - Una macchina fotografica. L'immagine degli oggetti si forma, durante la messa a fuoco, su un diaframma di vetro smerigliato.

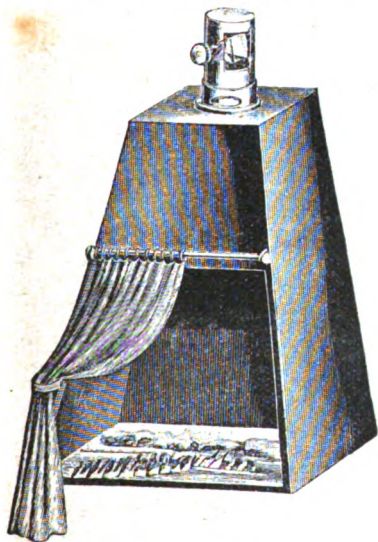



Fig. 245. - Camera lucida. Un prisma a riflessione totale manda i raggi provenienti da oggetti lontani esterni contro ad una lente convergente ad asse verticale che dà degli oggetti medesimi una immagine reale su un foglio da disegno. Seguendo col lapis, la traccia dell'immagine, si forma un disegno che è riproduzione grafica degli oggetti. La camera lucida può ritenersi un modello rudimentale di *periscopio.*

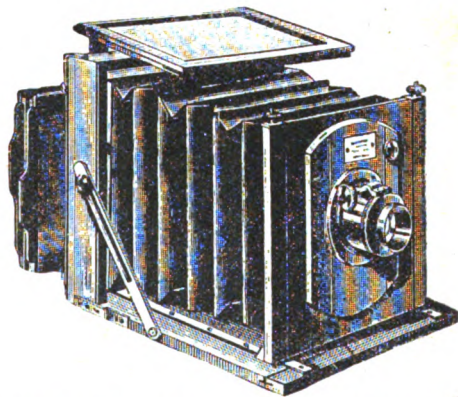



Fig. 247. - Al posto del vetro smerigliato, dopo la messa a fuoco si colloca lo *chassis* contenente la lastra. Dopo la collocazione, previa chiusura dell'obbiettivo, lo si apre come mostra la Fig. 248. Poi si apre per il tempo opportuno di posa l'obbiettivo.

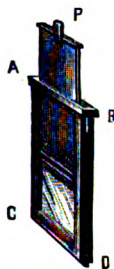



Fig. 248. - Uno *chassis* fotografico.

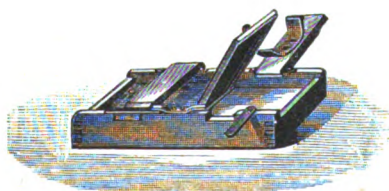



Fig. 249. - Torchietto per stampare fotografie.

Fig. 250. - Una lunga pellicola fotografica per cinematografo, durante lo sviluppo.

un sistema convergente che dà di un corpo luminoso od opportunamente illuminato, un'immagine capovolta ed ingrandita su uno schermo opaco o translucido; e la macchina fotografica costituita da una camera oscura formata a soffietto, che ha, invece di un esile foro in una parete, un vero e proprio sistema convergente detto obbiettivo, capace di dare una buona immagine degli oggetti esteriori sulla parete opposta, contro alla quale si colloca una lastra di vetro cosparsa di materiale sensibile alla luce. Questa lastra vien poi trattata opportunamente (sviluppo e fissaggio) perchè rimanga stabile l'impressione. Costituisce allora la così detta negativa nella quale alle parti illuminate dell'oggetto corrispondono parti opache e alle parti opache dell'oggetto parti trasparenti. Tale negativa serve poi ad impressionare, per passaggio di luce attraverso ad essa, fogli di carta cosparsi di materiale sensibile e ad essa sottoposti successivamente. Questi fogli trattati poi convenientemente costituiscono ordinarie fotografie dette positive per contrapposizione alle indicate prove negative.

Per la *fotografia a colori* (sistema Lumière), la lastra di vetro, sotto allo strato sensibile alla luce di ogni colore, ha uno strato di grani di fecola di patata, colorati, alcuni in rosso aranciato, altri in verde, altri in violetto, e disposti il più che possibile a triadi. Trattando opportunamente, dopo l'azione della luce diffusa dall'oggetto da ritrarre, la lastra (che fu a questo affacciata col vetro in avanti verso l'oggetto), si fa in modo che essa stabilmente sia resa trasparente in corrispondenza delle regioni colpite dalla luce filtrata dai grani di fecola, ed opaca in corrispondenza delle altre. Guardandola allora per trasparenza si nota nella lastra, per l'azione dei piccoli filtri di fecola colorata e per l'effetto di somma di luci, l'immagine colorata dell'oggetto ritratto.

Larghissima è l'applicazione della fotografia. Nel cinematografo, in virtù del principio sul quale questo è fondato, si riproduce il movimento coll'eseguire in una lunga pellicola le numerose fotografie, rappresentanti i vari atteggiamenti di ciò che si muove, e proiettando poi tali fotografie in rapida successione.

CAPITOLO XXII.

L'ANALISI SPETTRALE.

§ 215. **Spettri e loro classificazione.** — Lo spettro che si ottiene dalla luce proveniente da un corpo solido o liquido qualunque incandescente, è uno spettro quale è quello descritto, costituito cioè da tutte le radiazioni, procedenti, con sfumature continue, dal rosso, al verde al violetto. È quindi, come si dice, uno *spettro continuo.*

Lo spettro invece di un gas o di un corpo reso aeriforme e luminoso mediante un becco a gas opportuno, o mediante una scarica elettrica, è costituito da un numero più o meno grande di radiazioni semplici separate da intervalli estesi oscuri. È, come si dice, *discontinuo.*

Per la maggior parte dei gas o vapori resi luminosi si hanno spettri formati da righe brillanti, variabili di numero e posizione colla natura del corpo. Il sodio dà ad una osservazione non accurata una

riga gialla che si sdoppia con osservazione più accurata. Ma certuni corpi danno uno spettro che non apparisce a righe, sembra bensì formato da successioni di *nastri* colorati che danno l'impressione di una successione di *colonne* di un portico colle loro regioni d'ombra sfumate. Si vedono difatti tanti nastri sfumati lentamente e più da una parte che dall'altra, di modo che ci appariscano all'occhio come separati tra loro. Spettri di simile natura si dicono *spettri a colonnato* e siccome queste diverse regioni si possono considerare come altrettanti nastri, si dicono anche *spettri a nastro* o, alla francese, *spettri a bande.*

Con forti dispersioni si è riusciti a vedere che tali spettri sono costituiti da tante righe finissime. Tali linee hanno distanze esprimibili con funzioni algebriche più o meno semplici.

La luce degli aeriformi non è dunque così complessa come quella dei solidi o dei liquidi. Ed è, per giunta, caratteristica dei corpi che la emettono, in quanto gli spettri ottenuti *nelle stesse condizioni* colla luce emessa dai diversi aeriformi son tutti differenti da corpo a corpo, e, per uno stesso corpo, sempre uguali. Lo spettro dei gas non è invariabile; aumentando la pressione e la densità, le righe diventano più larghe e vanno accostandosi fra loro: si comprende quindi che a grande pressione si può ottenere uno spettro continuo cioè non a righe.

Come si ottengono spettri caratteristici detti di *emissione* analizzando direttamente la luce emessa dai corpi, così si ottengono per certi corpi spettri caratteristici detti di *assorbimento* analizzando la luce bianca che abbia attraversato i corpi medesimi.

Interessante spettro di assorbimento è quello della sostanza rossa (emoglobina od ossiemoglobina) che colora il sangue e quello della sostanza verde (clorofilla) che colora le piante).

§ 216. **Righe del Wollaston dette del Fraunhofer.** — Lo spettro della luce solare, a prima vista continuo, è in realtà discontinuo, è le discontinuità sono date da righe nere di assorbimento dette *righe del Fraunhofer* per quanto fossero state messe in evidenza dal Wollaston.

Wollaston e più tardi Fraunhofer osservando con un cannocchiale acromatico lo spettro solare, dato da un prisma a costituzione bene omogenea, lo videro solcato da righe nere aventi la stessa direzione degli spigoli del prisma. Esse rimanevano fisse per numero e per posizione relativa al variare della sostanza costituente il prisma e al variare dell'angolo rifrangente di queste.

Fraunhofer osservò oltre seicento di queste righe disugualmente distribuite, e le riunì in 8 gruppi ciascuno dei quali con piccola dispersione apparisce come una sola riga, e li distinse colle lettere *A, B, C, D, E, F, G, H.* Oggi sono state osservate più di duemila righe.

La riga del sodio non sdoppiata si trova in prossimità della riga *D* di Fraunhofer. Si pensò ad una corrispondenza, e valendosi di un prisma a riflessione totale si fece attraversare la fenditura, per la parte superiore dalla luce solare così da averne lo spettro colle righe del Fraunhofer, e per la parte inferiore dalla luce di una fiamma con tracce di sodio. Si notò la formazione della riga gialla del sodio, e si vide che essa si trovava perfettamente in coincidenza colla riga *D* di Fraunhofer. Con mezzo dispersivo atto a sdoppiare la riga del sodio

si vide che le componenti corrispondevano a due righe del gruppo D di Fraunhofer chiamate D_1 e D_2.

Analogo risultato si ottenne con altri spettri di emissione. È lecito allora supporre che fra il nucleo solare e il prisma vi siano dei corpi trasparenti che *assorbano* le radiazioni costituenti gli spettri di numerosi corpi; quelle corrispondenti alle radiazioni che mancano nello spettro solare. Si tratterà forse di questo, che il Sole sia una sfera solida o liquida incandescente (che di per se sola produrrebbe uno spettro continuo costituito da tutte le luci) la quale sia circondata da un involucro di vapori avente temperatura inferiore. Indichiamo nel seguente prospetto i principali gruppi di righe del Fraunhofer, e, anticipando la nozione che le varie luci si distinguono per la loro lunghezza d'onda nel processo di propagazione loro per onde trasversali nell'etere cosmico, indichiamo il valore della lunghezza d'onda media corrispondente alle luci delle quali le righe nere prendono il posto nello spettro solare.

Notazione di Fraunhofer	Regione dello spettro		Lunghezza d'onda espressa in decimilionesimi di millimetro	Elemento che la determina
A	Rosso estremo		7.594,059	*O*
B	Rosso		6.867,461	*O*
C	Rosso		6.563,054	*H*
D	Giallo . . .	D_1	5 896,154	*Na*
		D_2	5.890,182	*Na*
E	Verde . . .	E_1	5.270,448	*Fe*
		E_2	5.270,533	*Ca*
		E_3	5.269,722	*Fe*
F	Azzurro		4.861,496	*H*
G	Indaco . . .	G_1	4.308,071	*Fe*
		G_2	4.307,904	*Ca*
H	Violetto estremo		3.968,620	*Ca*

A giustificare la indicata interpretazione delle righe del Fraunhofer serve il seguente principio (estensione del principio di Kirchhoff considerato nel § 103): *Le radiazioni emesse da un corpo aeriforme sono assorbite dallo stesso aeriforme a temperatura inferiore.*

A dimostrare sperimentalmente tale principio può servire la esperienza detta *dell'inversione dello spettro* alla quale si accenna nella Fig. 251. Si tratta in sostanza della corrispondenza fra i poteri emissivo ed assorbente di un medesimo vapore, per i raggi luminosi di uguale specie e il fatto della inversione si può interpretare come un fenomeno di risonanza osservando per analogia come l'energia vibratoria di una corda mette in moto le altre corde uguali che si trovano in sua prossimità e non fa sentire il suo effetto più

Fig. 251. - Come si possono mettere in rilievo, fuse insieme però, le righe di assorbimento del sodio.

GLI SPETTRI.

1° Il *solare* colle principali righe nere del Fraunhofer.

2° *Spettri di emissione.*

Spettro di emissione continuo quale vien dato da un solido o da un liquido incandescente. *Spettri di emissione discontinui* del vapore incandescente di sodio e dell'idrogeno. Si noti come le due righe gialle costituenti lo spettro del sodio occupano la stessa posizione delle righe aere D_1 D_2 di Fraunhofer.

3° *Spettri di assorbimento.*

Spettri di assorbimento a righe del vapore di sodio e dell'idrogeno: sono in qualche modo i loro spettri di emissione *invertiti. Spettri di assorbimento a bande* della ossiemoglobina che colora il sangue, e della clorofilla che dà il colore alle parti verdi delle piante.

TIP. LIT. A. CACCIARI - BOLOGNA

lontano dato l'assorbimento effettuatone da queste corde. Riterremo dunque che il Sole sia costituito da una massa interna (nucleo) che emette tutte le radiazioni possibili e da una massa aeriforme circostante che assorbe un buon numero di tali radiazioni. Là dove queste radiazioni dovrebbero trovar posto nello spettro solare si ha un intervallo nero.

Fig. 252. - Schema di un semplice spettroscopio. La luce si invia attraverso al collimatore su una faccia del prisma, e si osserva all'emergenza attraverso ad un cannocchiale. Sul ventaglio di luce che si osserva vien proiettata, per definire la posizione rispettiva delle varie radiazioni, la scala a millimetri trasparente del micrometro.

§ 217. **Analisi spettrale e spettroscopio.** — Sull'esame degli spettri, sia di emissione, sia di assorbimento, è basato tutto un sistema di analisi delle sostanze, detto *analisi spettrale.* Questa si compie non già con un semplice prisma, ma con speciali apparecchi, detti spettroscopi, le cui parti essenziali sono, un prisma od un sistema di prismi, destinato ad operare la dispersione della luce in esame, ed un cannocchiale per la osservazione dello spettro formatosi.

La Fig. 252 indica uno spettroscopio semplice colle varie sue parti principali e secondarie. La Fig. 253 indica come con tale spettroscopio si fa una osservazione.

Fig. 253. - Come si guarda attraverso allo spettroscopio. La fiamma contro a *C* dà la luce da esaminare. La luce della candela *D* serve a proiettare la scala micrometrica.

Esso è il primo spettroscopio costruito che porta il nome da Bunsen e Kirchhoff. Un prisma di vetro di flint cogli angoli di 60° è montato sopra un piede di ghisa, il quale porta il tubo *c*, chiamato *collimatore*; un *cannocchiale B* e un *tubo D*; tubi tutti disposti coll'asse orizzontale.

Il collimatore ha per iscopo di rendere paralleli i raggi, che, provenienti dalla sorgente da esaminare, passano per la fessura di cui si è già parlato, arrivano su di una faccia del prisma attraverso a cui si *disperdono*, piegandosi verso la base, e possono essere ricevuti nel cannocchiale *B* attraverso al quale si vedono tante immagini dalla fenditura quante sono le luci costituenti quella da esaminare, cioè lo *spettro di questa luce*.

Però, siccome si è riconosciuto il bisogno di una scala di riferimento per decidere della posizione delle righe, si proietta una scala ben illuminata là dove escono i raggi dispersi, che viene così osservata col cannocchiale sovrapposta alla spettro.

Ciò si ottiene servendosi del tubo *D* il quale porta all'estremità opposta al prisma un coperchio di metallo, avente una piccola fessura nella quale è incastrata una lastrina di vetro smerigliato colle minutissime righe trasparenti costituenti la scala. Questa, con un lume esterno e con una lente interna al tubo, viene proiettata sulla faccia di emergenza. Per avere un termine di confronto si suole, all'inizio dell'osservazione, far corrispondere alla divisione 50 della scala, la riga gialla del sodio.

Questo però è uno spettroscopio che permette risultati abbastanza ristretti. Si può, come abbiamo detto, con un sistema di prismi successivi, amplificare lo spettro, il quale per conseguenza non si potrà vedere che a pezzetti.

Spettroscopio a visione diretta. — Si dice spettroscopio a visione diretta, quello spettroscopio in cui cannocchiale e collimatore sono sul medesimo asse. Ciò può ottenersi mercè la possibilità di annullare la deviazione del prisma, senza annullare la sua dispersione, precisamente come si può annullare la dispersione senza annullare la deviazione (acromatismo). Unendo due prismi di materiale convenientemente diverso, uno in senso inverso dell'altro, si può far sì che la deviazione sia annullata per un raggio dello spettro, ad esempio per un raggio *verde* medio mentre non sia annullata la dispersione (soluzione del problema inverso a quello dell'acromatismo). Allora si vedono le varie colorazioni dello spettro ai lati della verde e quindi si ha lo spettro *non deviato*.

Siccome però presumibilmente lo spettro risulterebbe troppo ristretto, si suole usare nello spettroscopio più d'una di queste coppie, in guisa da accentuare la dispersione, senza cambiare la direzione dei raggi. Il cannocchiale di osservazione dovrà essere sensibilmente in linea retta col collimatore. Lateralmente si avrà il tubo per la proiezione della scala.

Nel § 215 abbiamo rapidamente accennato ad artifici atti ad ottenere la luce osservabile collo spettroscopio.

Per avere lo spettro dei metalli, questi devono essere portati allo stato di vapore incandescente e ciò si fa mediante un forte riscaldamento: colla fiamma Bunsen o meglio per mezzo della scarica elettrica. Per lo spettro di un gas si provoca la scintilla elettrica nel gas messo allo stato di conveniente rarefazione in un tubo da scarica.

§ 218. **Spettroscopia siderale.** — Poichè l'analisi spettrale è basata sull'analisi delle luci, essa può riguardare oltre i corpi esistenti alla superficie della Terra anche i corpi celesti che mandano luce sino a noi.

Lo spettroscopio, applicato allo studio del cielo, ha portato a grandi e numerose conquiste scientifiche e alla enunciazione di ardite ipotesi.

§ 219. **Principali risultati ottenuti coll'analisi spettrale.** — Per lo studio della costituzione chimica dei corpi, basta una piccolissima quantità di una data sostanza contenuta in un corpo perchè nello spettro della luce di questo si vedano le righe di quella.

Nella fiamma di un becco Bunsen si può riconoscere:

$$\frac{1}{14000000} \text{ di milligrammo di sodio}$$

$$\frac{1}{60000} \quad \text{»} \quad \text{di litio}$$

$$\frac{1}{50000} \quad \text{»} \quad \text{di calcio.}$$

È raro quindi che nello spettro di una sorgente luminosa in contatto con l'aria, che contiene sempre delle piccole quantità di sali di sodio, non appariscano le righe gialle di questo elemento. Si potrebbe dire che la spettroscopia costituisce il più sensibile metodo di analisi della materia, se la scoperta della radioattività non avesse indicato un modo di investigazione della materia meno generale, forse, ma incomparabilmente più sensibile in certi casi. Coll'analisi spettrale si poterono scoprire nuovi corpi che più tardi soltanto furono ottenuti chimicamente, e cioè il litio, il rubidio, il cesio, il tallio, l'indio, il samario, l'olmio, il disprosio, l'europio. Si potè trovare che il didimio ritenuto elemento era in realtà costituito da neodimi e da praseodimi, che l'itterbio è costituito da neoitterbio e da luterio, e che il luterio è accompagnato nelle Gadolimite da un elemento nuovo: il celtio.

Ma i risultati più interessanti si ebbero approfittando della proprietà di poter osservare la luce degli oggetti molto lontani, nello studio della natura chimica dei corpi celesti.

L'esame della luce solare ha permesso di iniziare con qualche profitto lo studio della sua costituzione (nucleo, solido o liquido, incandescente la cui superficie detta *fotosfera*, sarebbe circondata da uno strato assorbente detto *guscio di inversione* la cui parte superiore meno densa costituirebbe la cosidetta *cromosfera* circondata a sua volta dalla *corona* visibile solo nei momenti di eclisse totale), della essenza delle così dette *macchie solari* (regioni oscure di dimensioni variabili pur rimanendo colossali rispetto al diametro della Terra), delle fiamme che stanno loro intorno dette *facole* e delle *protuberanze*, immense colonne luminose che appariscono qua e là attorno al disco e che sembrano formate da idrogeno.

Sul conto del nucleo solare, va detto che per ragioni che qui non possiamo indicare, si fa strada il pensiero che non sia solido o liquido, ma gassoso. Lo spettro continuo che esso emette dipenderebbe dalla forte pressione alla quale la massa aeriforme sarebbe soggetta.

I pianeti o satelliti danno naturalmente lo stesso spettro solare

all'infuori di alcune righe nere speciali che sono dovute all'assorbimento della loro atmosfera quando esiste. Anche l'atmosfera della Terra si comporta analogamente. Le righe nere ad essa dovute si dicono telluriche.

Le comete fanno parte pure del sistema solare ma hanno una luce propria che in parte è solare, diffusa o riflessa, in parte è luce propria, cosicchè nello spettro si vedono le righe del Sole e righe proprie. Queste ultime corrispondono a quelle di certi corpi composti specialmente di idrocarburi.

Lo spettro delle stelle fisse è pure a righe nere e quindi le stelle non sono che altrettanti soli, di più si nota che come per il Sole alcune di queste righe corrispondono in generale a corpi a noi ben noti, come ad esempio il magnesio e il ferro.

Si considerano quattro tipi principali di stelle in corrispondenza del diverso loro colore e corrispondentemente del loro spettro (bianche, gialle, aranciate, rosse) e si è emessa la ipotesi che i vari tipi corrispondano ai vari stadi di una evoluzione alla quale andrebbero soggetti i corpi celesti.

Di grande importanza per la teoria della evoluzione cosmica sembrano anche le osservazioni spettroscopiche delle stelle variabili e delle nebulose. Di queste, la principale, quella alla quale noi apparteniamo, è la *Via lattea*. Con potenti telescopi molte nebulose perdono l'aspetto di luce diffusa e si riconoscono essere veri ammassi di stelle vicine le une alle altre. La stessa Via lattea non è che un ammasso stellare e basta un semplice cannocchiale da teatro per confermarlo. Ma vi sono delle nebulose che anche osservate coi più potenti telescopi rimangono sempre tali: queste sono dette non risolubili, mentre le prime vengono chiamate risolubili. Ma se i potenti telescopi non sono giunti a scoprire la loro natura, la spettroscopia vi è arrivata. Se esaminiamo lo spettro delle risolubili vediamo che non è altro che quello dato dalle stelle, ma se esaminiamo le non risolubili vediamo che alcune di esse danno lo spettro delle stelle ed altre danno uno spettro diverso, sempre però a righe, tra le quali principali quelle dell'idrogeno. Si concluse che le prime vanno ascritte fra le risolubili e le altre nebulose non sono che enormi ammassi di gas ad elevatissime temperature e destinate, forse col tempo, a formare nuovi mondi o nuovi sistemi planetari.

In tutte queste osservazioni astrofisiche vi è per altro una circostanza di cui bisogna tener conto, ed è che ciò che noi osserviamo non è lo stato presente delle cose, ma il passato, perchè se la luce ha una velocità di 300000 chilometri al secondo, le distanze attraverso cui si guarda sono grandissime. Ci basti dire che la luce del Sole per arrivare a noi impiega otto minuti primi e che la più vicina delle stelle è a tale distanza che occorrono più di due anni alla sua luce per arrivare al sistema solare. Figuriamoci poi quale distanza sarà quella a cui si trova una nebulosa lontanissima: non è esagerazione il dire che occorrono dei secoli alla sua luce per giungere a noi, e quindi noi ora osserviamo ciò che in realtà accadeva dei secoli addietro, e può darsi benissimo che quelle che noi osserviamo abbiano già subìto sostanziali trasformazioni.

CAPITOLO XXIII.

I FENOMENI DI INTERFERENZA, DI DIFFRAZIONE E DI POLARIZZAZIONE.

§ 220. **Nozioni generali sui fenomeni dell'ottica fisica.** — Nel § 129 abbiamo asserito che numerosi fenomeni studiati in una parte dell'ottica, detta *ottica fisica*, avvalorano l'opinione secondo la quale la luce sarebbe prodotta da un moto vibratorio, interno agli atomi dei corpi luminosi, propagantesi nello spazio mediante il movimento ondulatorio di un *qualche cosa*, al quale si è dato il nome di *etere cosmico*; mentre destituiscono di ogni fondamento un'ipotesi sostenuta già dal Newton e secondo la quale la luce avrebbe consistito in una proiezione in linea retta di tenuissimi corpuscoli costituiti da un fluido, detto *fluido lumico*. Questi corpuscoli avrebbero posseduto una polarità per cui due regioni estreme ed opposte di ognuno di essi avrebbero avuto costituzione e comportamenti in certo modo opposto. Inoltre essi sarebbero stati animati da un moto di rotazione intorno ad un asse normale alla linea dei poli e alla traiettoria di traslazione (raggio luminoso).

Vogliamo adesso passare in rapida rassegna alcuni di quei fenomeni tanto interessanti, limitandoci a dire sul loro conto ciò che è consentito dire col linguaggio e col ragionamento elementare che solo ci è consentito in questo modesto libro.

Prima però esponiamo in poche parole i cardini della teoria ondulatoria, le nozioni fondamentali di essa. Tutto ciò a rigor di logica dovrebbe essere considerato soltanto dopo che la nozione delle modalità dei fenomeni ce lo imponessero. Ma non seguiamo questa via suggerita dalla logica, perchè crediamo che ad intendere questi fenomeni giovi la loro interpretazione e la previsione loro per mezzo della teoria. Comunque, non dimenticheremo mai che la teoria non ha alcun valore assoluto. Essa è una semplice supposizione che potrebbe per avventura non corrispondere alla realtà. Ciò che le dà un qualche valore è la circostanza che essa interpreta e collega abbastanza bene i vari fenomeni. Questi ultimi invece hanno un valore effettivo, in quanto da un nuovo fenomeno che non possa interpretarsi colla teoria, senza che questa subisca una diminuzione di valore e da un nuovo fenomeno che ad essa contraddica, si è indotti ad abbandonare o a modificare codesta teoria. Così dovette abbandonarsi la teoria della emissione della luce, allorchè si scoprirono quei fatti, dei quali appunto intendiamo occuparci in quest'ultima parte del nostro studio, che apertamente la contraddicevano.

Lo studio da noi fatto finora delle radiazioni luminose ci ha messo in chiaro che ad esse si trovano legate da una stretta parentela altre radiazioni, che non hanno la facoltà di impressionare il nostro organo visivo, ma che (a parte questa circostanza) si debbono sostanzialmente ritenere della stessa natura delle radiazioni luminose. Sono le radiazioni ultrarosse e le radiazioni ultraviolette. Ciò che diremo intorno alla intima natura delle radiazioni luminose si dovrà quindi intendere esteso a tali radiazioni non luminose. E si dovrà anche ritenere esteso a quelle radiazioni elettriche od onde elettriche, delle quali si parlerà nel Cap. XXVIII ed a quelle radiazioni dette raggi X o del Röntgen delle quali pure parleremo più avanti nel Cap. XL.

§ 221. **Elementi caratteristici di una radiazione.** - Ci è noto che una perturbazione sonora ben definita, la quale si propaghi nello spazio attraverso ad un mezzo materiale, ha come caratteristiche principali, dipendenti dallo stato vibratorio che la costituisce, l'*intensità* e l'*altezza*. Analogamente, le diverse radiazioni propagantisi attraverso all'etere cosmico possiedono come caratteristiche dipendenti dal moto vibratorio che le costituisce l'*intensità* e la *frequenza*. L'intensità corrisponde all'ampiezza della vibrazione, come l'intensità sonora. La frequenza è misurata dal numero n delle vibrazioni compiute nel minuto secondo. Essa è l'inversa del periodo T di una vibrazione. Cosicchè la relazione loro sarà: $T = \frac{1}{n}$.

L'elemento caratteristico sostanziale è la frequenza.

§ 222. **La propagazione della radiazione attraverso all'etere.** — Come la propagazione delle vibrazioni sonore si ha senza trasporto della materia costituente il mezzo nel quale avviene la propagazione, altrettanto si ritiene avvenire delle radiazioni che si propagano attraverso l'etere.

La teoria ondulatoria deve ammettere, e noi vedremo quali fatti la forzano a ciò, che le vibrazioni luminose si propaghino (§ 247) per *onde trasversali: le vibrazioni che si propagano si compiono sempre in direzione perpendicolare a quella della propagazione.*

§ 223. **Relazione fra velocità di propagazione, periodo e lunghezza d'onda.** — Anche per il caso delle onde trasversali dell'etere vale quella relazione fra velocità v di propagazione della perturbazione luminosa o simile, numero di vibrazioni n del centro di scuotimento (luminoso come sonoro) e lunghezza d'onda λ, che già considerammo nel § 243 del prec. volume. Vale cioè la relazione $v = n\lambda$, la quale consente di determinare il valore di uno qualsiasi dei tre elementi che vi figurano quando si conoscano i valori degli altri due.

Ordinariamente, si assume come elemento caratteristico di una radiazione la lunghezza d'onda λ, e si ritengono fisicamente differenti le varie radiazioni per il differire della loro lunghezza d'onda.

§ 224. **Principio di Huygens - Graduazione dell'onda - Raggio luminoso.** — Sia un punto luminoso O, una superficie d'onda S ed un punto P situato al di là di questa nel senso della propagazione. Si ammette:

Il movimento vibratorio inviato dalla sorgente O ad un punto P è in ogni istante il moto risultante di tutti i moti vibratori inviati a P dai diversi elementi di un'onda antecedente S qualsiasi, ciascuno di questi elementi essendo considerato come un centro particolare di vibrazione.

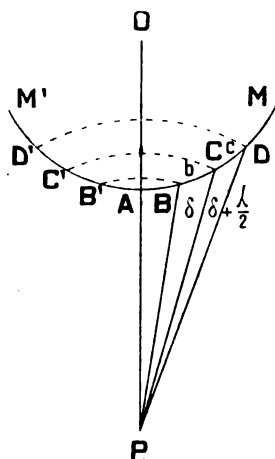
Fig. 254.

Ciò equivale a dire che un'onda luminosa completa può essere considerata come il luogo geometrico di una infinità di sorgenti sincrone, la cui azione risultante in un punto preso al di là fornisce l'intensità luminosa inviata dalla sorgente al punto. Questo principio dovuto ad Huygens è stato precisato dal Fresnel nel modo che vedremo. Si tiri lo retta OP; il punto A di intersezione coll'onda S è detto *polo* di questa.

Se sull'arco MM', dai due lati di A (Fig. 254), prendiamo tanti punti B, C, D...; B', C', D'... tali che le distanze da P di due punti consecutivi differiscano di una semionda della luce considerata e facciamo poi ruotare la figura intorno ad OP, l'arco MM' genererà la superficie dell'onda, e ciascuno dei piccoli archi AB, BC, CD..., genererà una zona sferica detta *zona elementare.* Le azioni prodotte in P dai punti di ciascuna zona, saranno sensibilmente concordanti; ma quelli prodotti dai punti della O dalla calotta ABB' e quelle dei punti della 2ª zona $BCB'C'$ saranno fra loro discordi, mentre quelle della 3ª zona $CDC'D'$ e quelle della calotta ABB' saranno fra loro concordi ecc. L'effetto prodotto in P da ciascuna zona dipende dalla estensione, dalla distanza e dalla inclinazione dei raggi.

Qualora si confrontino gli effetti di elementi vicini, possono ritenersi uguali la distanza e l'inclinazione, e quindi l'effetto dipenderà solo dalla estensione. Siccome si dimostra che una zona elementare è uguale alla semisomma delle due contigue, consegue che l'effetto della seconda zona è distrutto dalle due metà contigue della prima e della terza; analogamente, l'effetto della terza zona è annullato dalla metà della seconda e dalla metà della quarta ecc. Si può quindi dire che efficaci sono soltanto la metà della prima zona che è attorno al polo A, e la seconda metà dell'ultima. Ma data la distanza di questo e la obliquità dei raggi, non produce effetto sensibile: l'effetto quindi sarà approssimativamente dovuto solo alla prima semizona elementare che circonda il polo A.

Qui sta l'aggiunta del Fresnel al principio di Huygens, nel mostrare cioè che nella propagazione assolutamente libera attraverso ad un mezzo isotropo, l'azione di un'onda in P si riduce a quella di una piccola *zona efficace* situata attorno al polo. Da ciò risulta immediatamente la legge della propagazione rettilinea. Se si considerano difatti (Fig. 255) le onde successive S, S'... si vede che le zone efficaci piccolissime ab, $a'b'$... considerate successivamente in esse sono incontrate normalmente da una medesima retta AA'... P passante per il punto P. Questa retta costituisce dunque il raggio di luce propagantesi nel mezzo isotropo considerato. In modo generale si potrà dire che *i raggi luminosi sono le normali comuni alle onde successive.*

Se si pone in A uno schermo forato, si può facilmente comprendere che quando

il foro scopre solo la prima semizona elementare, l'illuminazione in P avviene come se l'onda si propagasse liberamente. Ma allargando gradatamente il forellino si ha che, quando si scopre tutta la prima zona soltanto, la illuminazione in P è maggiore di quella che si otterrebbe colla libera propagazione dell'onda; quando si scopre anche la seconda zona, l'illuminazione di P passerà per un minimo e così via.

Tali conclusioni si verificano con l'esperienza e sono una manifestazione dei fenomeni di *diffrazione* dei quali parleremo più avanti.

Fig. 255.

§ 225. **La velocità di propagazione della luce nei vari mezzi, secondo la teoria della emissione e secondo quella delle ondulazioni.** — Nella misura effettuata dal Foucault dei valori relativi della velocità di propagazione della luce in mezzi diversi come aria ed acqua, in confronto colle relazioni che fra tali indici facevano prevedere le due teorie della emissione e delle ondulazioni, si ebbe l'*experimentum crucis* per dichiarare falsa l'una ed accettabile l'altra delle due teorie medesime. Giacchè una, come più sotto diremo, faceva prevedere maggiore la velocità di propagazione della luce nell'acqua che nell'aria (in genere nei mezzi più rifrangenti che nei meno) e l'altra l'opposto.

La teoria della emissione e quella delle ondulazioni rendono conto tanto del fenomeno della riflessione come del fenomeno della rifrazione. Per questo secondo fenomeno però si ha dalla prima delle teorie la seguente conclusione:

Se si rappresenta con V_1 la velocità di propagazione della luce nel primo mezzo e con V_2 la velocità di propagazione nel secondo, è

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{V_2}{V_1}; \qquad (56)$$

cioè il rapporto del seno dell'angolo di incidenza al seno dell'angolo di rifrazione (vale a dire l'indice di rifrazione del secondo mezzo rispetto al primo) è uguale al rapporto della velocità di propagazione della luce rispettivamente nel secondo e nel primo mezzo

Dalla teoria delle ondulazioni si ricava invece che:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{V_1}{V_2}; \qquad (57)$$

cioè che il rapporto fra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione (indice del secondo mezzo rispetto al primo) è uguale al rapporto della velocità della luce nel primo e nel secondo mezzo rispettivamente.

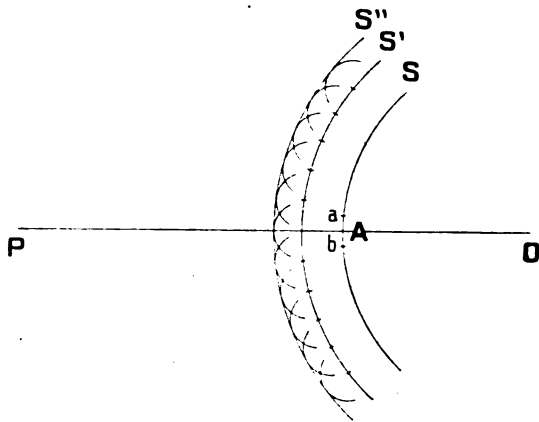
In altre parole per un indice relativo minore, o, rispettivamente, dell'unità si deve avere, in base alla teoria delle ondulazioni, che la velocità nel primo mezzo deve essere minore, o, rispettivamente, che nel secondo; mentre che in base alla teoria della emissione si deve avere l'opposto.

L'indice relativo dell'acqua rispetto all'aria è $^4/_3$. Basterà in prima approssimazione decidere se la velocità della luce nell'acqua è maggiore o minore di quella che la luce ha nell'aria per scegliere fra le due teorie.

La misura fatta dal Foucault col metodo da noi già descritto (Fig. 122 - pag. 114) dettero ragione alla teoria delle ondulazioni. Ulteriori numerose misure dettero ragione a tale previsione considerata nella sua generalità.

Supponendo che il primo mezzo sia il vuoto e rappresentando con V la velocità, ritenuta costante, della luce in esso, si può scrivere:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{V}{V_1}$$

e si può dire in generale che la velocità della luce in mezzi di varia rifrangibilità decresce

colla rifrangibilità e precisamente è inversamente proporzionale all'indice di rifrazione. L'ultimo rapporto suindicato esprimente l'indice assoluto per il mezzo nel quale la velocità ha il valore V_1, varia col colore del raggio incidente e ciò per il variare di V_1, dovendosi ritenere V costante. Al fatto che la velocità della luce in mezzi differenti è varia per i diversi mezzi si deve il fenomeno della rifrazione. Al fatto che le differenti luci hanno in un medesimo mezzo velocità differenti si deve il fenomeno della dispersione.

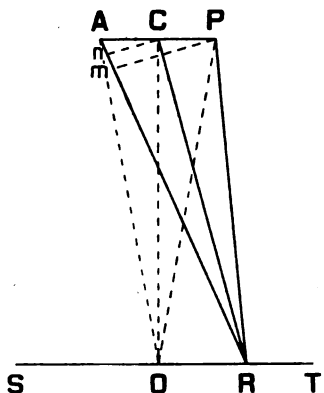
INTERFERENZA.

§ 226. **Il fenomeno di interferenza.** — Un fenomeno che manifesta molto evidentemente la natura vibratoria della luce ed il carattere ondulatorio della sua trasmissione è quello d'*interferenza*, che, come col suono, può prodursi anche con la luce, *a patto che i due fasci interferenti abbiano un'origine comune e che le immediate sorgenti di questi fasci abbiano piccolissime dimensioni*. La prima condizione è un'altra forma, in virtù del modo peculiare d'essere del fenomeno luminoso (§ 248), della condizione di perfetta concordanza dei due centri di scuotimento già indicata per il suono. La seconda condizione dipende da ciò che con due sorgenti pur sincrone, ma di una qualche estensione, ogni punto dell'una, associato con un punto dell'altra, darebbe origine ad un sistema di interferenza, ed i numerosi sistemi che per tal modo si otterrebbero porterebbero ad una reciproca confusione.

Si capisce che l'interferenza per il caso della luce è il fenomeno per cui nel luogo ove due fasci interferiscono, si avrebbe per alcune regioni assenza di moto (cioè *oscurità*) e per altre regioni maggiore intensità di moto (cioè *viva luce*). E si capisce come nella supposizione della natura ondulatoria della luce si possa anche prevedere valido per essa il principio generale della interferenza, in virtù del quale si abbia, per l'azione simultanea dei due sistemi interferenti, distruzione reciproca di moto in quei punti che abbiano distanze dai centri di scuotimento differenti fra loro per un numero dispari di mezza lunghezza d'onda, mentre si abbia massimo movimento per somma reciproca di moto in quei punti le cui distanze dai centri di scuotimento siano differenti fra loro di un numero pari di mezze lunghezze d'onda. Le prime esperienze atte a mostrare che luce aggiunta a luce produce in certe regioni oscurità ed in regioni prossime intensificazione di luminosità, si debbono all'abate italiano Grimaldi. Esse vennero poi in seguito riprese e perfezionate o modificate dall'inglese Young, tanto che per non mentire la loro fama e per non interrompere la tradizione, gli stranieri nei libri e nelle pubblicazioni le chiamano senz'altro esperienze di Young.

Fig. 256.

È facile immaginare un'esperienza di interferenza nell'ipotesi della natura ondulatoria della luce.

Si disponga di due sorgenti luminose lineari rappresentate in sezione dai punti A e P (Fig. 256); perfettamente uguali e vicine l'una all'altra. Si raccolga la luce emessa simultaneamente da esse su di uno schermo ST qualunque, parallelo alla linea che congiunge i due punti AP. Consideriamo il punto O, ottenuto innalzando la perpendicolare dal punto di mezzo C di AP alla retta che rappresenta lo schermo. In esso va luce da entrambe le sorgenti e gli effetti di queste si sommano. Poco al di sopra e poco al di sotto di questo punto O ve ne saranno due come R, ciascuno dei quali avrà distanze dalle sorgenti che differiranno fra loro di mezza lunghezza d'onda della luce monocromatica immaginata in A e in P. Quivi, distruggendosi gli effetti delle due sorgenti, dovrà aversi oscurità. Più sotto e più sopra ancora si troveranno due punti, tali che per ciascuno di essi si abbia che la differenza delle distanze da A e da P sia di una intera lunghezza d'onda. Qui gli effetti delle sorgenti si sommeranno e si avrà luce.

Data la grande vicinanza di A e di P rispetto alla distanza di essi dallo schermo si potrà ritenere che, sensibilmente, le differenze di distanza di punti come R da A e da P sia data dai tratti come Am ottenuto abbassando da P la perpendicolare Pm su AR. Ciò sarà tanto più approssimato quanto più lo schermo sarà lontano dai punti A e P.

Si dovrà in sostanza avere sullo schermo una successione di regioni alternativamente illuminate ed oscure.

Questo si dovrà verificare per ogni luce e la distanza fra due regioni successive oscure od illuminate dipenderà dalla lunghezza d'onda della luce e crescerà con questa

§ 227. **Esperienza cogli specchi del Fresnel e con luce monocromatica.** — Il primo che riuscì a realizzare l'indicata esperienza con nettezza di manifestazione fu il fisico francese Agostino Fresnel, una delle menti più limpide che possa ricordare la Scienza, una delle attitudini sperimentali più eminenti, una delle più disinteressate ed apostoliche figure di scienziato.

Per realizzare due sorgenti luminose uguali identicamente sotto tutti i rapporti, il Fresnel si valse (Fig. 257) di una fenditura luminosa O della quale utilizzava le immagini O' ed O'' ottenute per riflessione di due specchi M ed MN, ad angoli poco inferiori ai 180°.

Fig. 257.

Così si premunì totalmente contro la possibilità di una non perfetta identità fra le due sorgenti, giacchè, essendo ciascuna delle due immagini uguale alle sorgente, dovevano risultare uguali fra di loro. Succedendo quindi anche che la sorgente non fosse *perfettamente stabile*, le due immagini ottenute di essa sono in ogni caso perfettamente uguali, ad ogni variazione dell'una corrispondendo uguale variazione dell'altra.

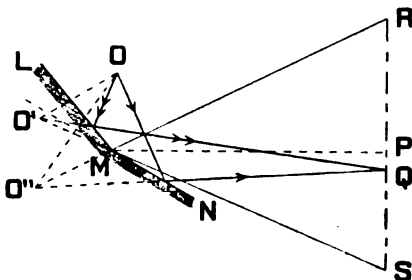
Mediante questo dispositivo, si ottengono sullo schermo, con una luce monocromatica qualsiasi, delle belle strisce (*frangie*) di interferenza (Fig. 258). Tali strisce o frangie risultano, secondo la previsione, di larghezza decrescente con la lunghezza d'onda della luce adoprata.

§ 228. **Misura delle lunghezze d'onda - Unità Angström.** — Misurando con metodo accurato (oculare di Fresnel munito di reticolo) la distanza fra le regioni centrali di due frangie successive, ottenute con una determinata luce monocromatica si può avere con la misura anche dell'angolo ACB il valore della lunghezza d'onda di questa.

Fig. 258.

Ecco come. Siano A e B (Fig. 259) i due centri luminosi, e sia O il punto di mezzo di AB. Siano bd, ef due onde successive che partono da B, distanti fra loro della lunghezza d'onda Cg. Sia hl un'onda che parta da A mentre da B parte la bd. In C sulla CO normale ad AB le due onde hl e bd giungono in concordanza: in a ancora giungono in concordanza hl ed ef perchè la differenza $Bg - AC$ dei loro percorsi sino a questo punto differisce della lunghezza d'onda λ. Stante la piccolezza della lunghezza d'onda, e dell'angolo ABC gli archetti aC, ag si potranno considerare come rette normali rispettivamente ai lati AC, BC: i due triangoli perciò aCg, ACB si potranno considerare come simili, e quindi

$$\frac{Cg}{aC} = \frac{AB}{AC}$$

da cui si ha

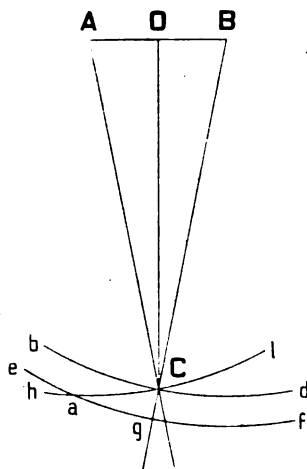
$$Cg = aC\,\frac{AB}{AC} = 2\,aC\,\frac{AO}{AC}.$$

Fig. 259.

Rappresentando quindi la distanza aC delle linee centrali delle due frangie consecutive con d, ed essendo $\frac{AO}{AC} = \text{sen}\ ACO$, sarà:

$$\lambda = 2d\ \text{sen}\ ACO. \qquad (58)$$

Noto quindi d ed ACB che è il doppio di ACO si può avere il valore della lunghezza d'onda.

Le lunghezze d'onda si sogliono valutare in *micron* (μ) o millesimi di millimetro. Talvolta si usa anche la unità Angström corrispondente a $10^{-4}\mu$ cioè al decimillesimo di micron o al decimilionesimo di millimetro.

Fresnel trovò per le luci corrispondenti alle seguenti righe di Fraunhofer queste rispettive lunghezze d'onda espresse in micron:

A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*
0,7593	0,6867	0,6562	0,5892	0,5269	0,4861	0,4307	0,3968.

Note le lunghezze d'onda, si può conoscere il numero corrispondente di vibrazioni al secondo, per mezzo della nota relazione $v = n\lambda$. Basta porre in questa il valore della lunghezza d'onda, il valore della velocità v di propagazione della luce e risolvere rispetto ad n.

Per le radiazioni corrispondenti ai diversi colori dello spettro si possono ritenere i seguenti valori, che riguardano le radiazioni presentanti nettamente le colorazioni indicate.

Colore della luce	Lunghezza λ d'onda in μ	Numero di vibrazioni n in trilioni al secondo
Rosso medio.	0,65	461
Aranciato medio	0,60	500
Giallo medio.	0,58	517
Verde medio	0,52	576
Azzurro medio	0,47	638
Indaco medio	0,41	731
Violetto estremo	0,39	769

Per i limiti dello spettro visibile dalla parte del rosso e del violetto si hanno per le lunghezze d'onda i valori 0,80 e 0,39; per i numeri di vibrazione i valori 375 e 769 trilioni al secondo.

È opportuno che indichiamo anche qualche lunghezza d'onda di radiazioni appartenenti al campo ultravioletto ed ultrarosso, radiazioni in parte contenute nello spettro solare ordinario ed in parte ottenute con procedimenti speciali.

Ultra-violetto	$0,^{\mu}103$	Limite dei cosidetti *raggi di Schumann* emessi dalla scarica elettrica in un tubo contenente idrogeno rarefatto.
	0,185	Limite di assorbimento dell'aria in limitato spessore.
	0,292	Limite dello spettro solare per l'assorbimento dell'atmosfera dovuto probabilmente all'ozono.
	0,36	Limite di utilizzazione degli spettroscopi a prismi di vetro.
. . . . . .		
Ultra-rosso	1,4	Limite dello spettro fotografato da Abney e Ritz.
	5,3	Limite dello spettro osservato dal Langley per mezzo di un termoscopio sensibile detto bolometro.
	96,7	Emissione della lampada a gas.
	314	Emissione dell'arco elettrico a mercurio.

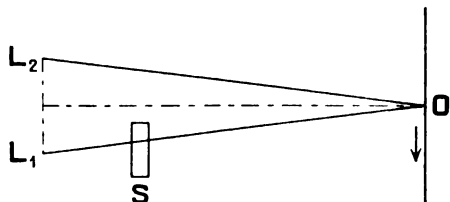
Nel Congresso internazionale di Fisica del 1900 si convenne di chiamare *regione* un intervallo compreso nello spettro fra due lunghezze d'onda, una doppia dell'altra (intervallo di *ottava* in acustica). Lo spettro luminoso visibile costituisce sensibilmente una regione (da 0,4 o 0,8 μ). La si rappresenta con R_0, e si conviene di numerare positivamente le regioni dell'ultrarosso mentre si numerano negativamente quelle dell'ultravioletto. L'ultravioletto comprende 2 regioni o 2 ottave e l'ultrarosso otto ottave e mezzo.

Impareremo più avanti come sia possibile ottenere onde trasversali nell'etere più lunghe delle ultrarosse (onde elettriche) e più brevi (sino a $0,^{\mu}0001$) delle ultraviolette suindicate (raggi X). A queste ultime corrisponde una frequenza di 2 quintilioni. Le prime si ottengono di varia lunghezza: le più lunghe usate in telegrafia senza filo sono di 30000 metri e corrisponde loro una frequenza di 10000.

Fig. 260.

§ 229. **Il fenomeno dell'interferenza può servire ad una misura dell'indice di rifrazione.** — Se si fa passare (Fig. 260) uno dei due fasci riflessi dagli specchi, quello di destra ad esempio, attraverso ad una laminetta di vetro, si vede tutto il sistema delle frangie spostarsi verso la destra, e ciò perchè la velocità

della luce nella sostanza della lamina è minore che nell'aria. La frangia centrale difatti, che risulta dalla sovrapposizione dei raggi che hanno impiegato lo stesso tempo a propagarsi fino a quel punto, deve spostarsi evidentemente verso la destra, se il raggio di sinistra si propaga con maggiore velocità; e lo stesso dicasi delle altre.

Su questo spostamento si può basare la misura dell'indice di rifrazione della sostanza costituente la lastrina (Rifrattometri interferenziali).

§ 230. **Frangie con luce composta.** — *Usando di luce bicromatica* (due colori) ad esempio rossa e azzurra si osserverà come frangia mediana una frangia dovuta alla sovrapposizione di due: l'una, rossa, più larga, l'altra, azzurra, più stretta. Tale striscia mediana apparirà del colore risultante dal rosso e dall'azzurro, salvo che sfumerà in rosso verso le regioni oscure prossime.

Verso queste le frangie luminose contigue sfumeranno l'azzurro.

Analogamente si ragionerebbe per una luce tricromatica.

È lecito arguire — e l'esperienza dimostra — che usando della luce bianca, si deve avere la striscia mediana dovuta alla sovrapposizione di tutte quelle corrispondenti alle luci semplici costituenti la bianca. La rossa, più grande, trasborderà dalle altre, che, sovrapposte l'una sopra l'altra, daranno in mezzo l'impressione del bianco, sfumante ai lati con iridescenza sino al rosso estremo.

Ai lati della frangia mediana si avranno due intervalli oscuri ai quali seguiranno due frangie con il violetto verso l'interno, la qual luce sfumerà verso le luci meno rifrangibili che hanno le frangie più larghe.

Nel complesso, usando luce bianca, apparisce una serie di strisce *iridescenti.*

Che il fenomeno delle frangie alternativamente oscure e luminose, oppure iridescenti, sia dovuto alla sovrapposizione dei due fasci riflessi, risulta sperimentalmente dimostrato da ciò che togliendo uno dei due specchi, o coprendolo con un corpo opaco, non si ha sulla parte illuminata dello schermo che una tinta uniforme.

§ 231. **Onde luminose stazionarie.** — Sino a poco tempo fa non si era potuto porre in rilievo l'interferire di un sistema di onde luminose incidenti su di uno specchio colle corrispondenti onde riflesse in modo da ottenere un sistema di onde stazionarie con nodi e ventri fissi, quale si ottiene invece tanto facilmente colle onde sonore. La difficoltà sta nella piccolezza delle onde luminose, ma è stata già superata dal Wiener per primo colla fotografia nel modo seguente.

Sia un fascio di raggi luminosi paralleli *OL* (Fig. 261) che cada normalmente su

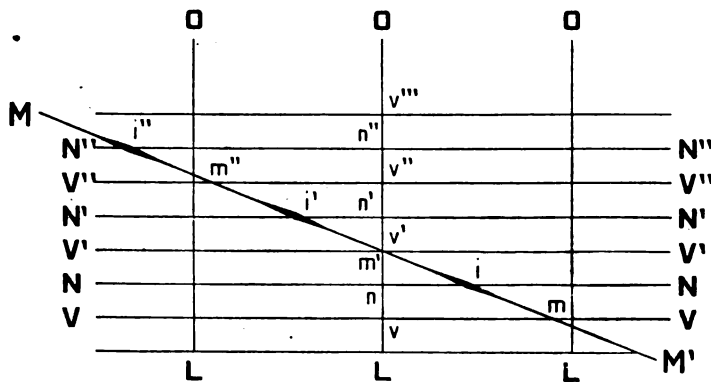



Fig. 261.

di uno specchio (una lastra di vetro argentata nella sua faccia anteriore). A questo fascio diretto incidente si sovrapporrà il fascio riflesso per modo che si avranno nodi e ventri fissi equidistanti. Evidentemente gli uni e gli altri si troveranno in piani paralleli allo specchio, che in figura potremo rappresentare con *VV, NN, V'V', N'N', V''V'', N''N''* ecc.

Nei nodi, distanti dallo specchio di $2\frac{\lambda}{4}$, $4\frac{\lambda}{4}$, $6\frac{\lambda}{4}$ ... si avrà un *minimo* di luce; nei ventri invece, distanti di $\frac{\lambda}{4}$, $3\frac{\lambda}{4}$, $5\frac{\lambda}{4}$ ... si avrà un *massimo.*

Data l'estrema piccolezza di λ non si può pensare a distinguere i nodi n, n' ... ed i ventri v, v' ... su una perpendicolare alla superficie dello specchio, il valore di $\frac{\lambda}{4}$ non sorpassando i $\frac{1}{10000}$ di millimetro.

Ma si potrebbero riconoscere, ricercando la luce su di una lastra fotografica MM' inclinata molto sullo specchio per ottenere che la distanza ii' di due nodi sia la più grande possibile. La lastra annerirebbe in corrispondenza dei massimi m, m', m'' quando essa venisse sviluppata, mentre che i minimi equidistanti i, i', i'' rimarrebbero intatti.

Nicew operò difatti in modo praticamente simile. Si può adoperare un strato di sostanza sensibile i cui piani siano sufficientemente piccoli rispetto alla lunghezza d'onda adoperata, limitato questo strato dal piano dello specchio e da una lastra di vetro disposta in modo da fare un piccolo angolo colla superficie dello specchio (per esempio lungo MM'): le frangie lineari m, i, m', i', m'', i''... appariranno collo sviluppo fotografico sufficientemente distanti (tanto come se si fosse trattato di una lastra fotografica) per la osservazione.

§ 232. **Altri dispositivi per produrre le frangie d'interferenza.** — Si hanno varie altre maniere, equivalenti a quelle già indicate, di produrre frangie di interferenza. Indicheremo solo le seguenti:

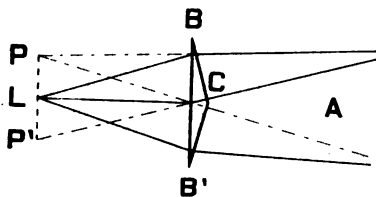



Fig. 262.

Biprisma di Fresnel. — Si tratta di due prismi (Fig. 262) ad angolo molto acuto appoggiati l'uno sull'altro per mezzo della faccia opposta all'angolo acuto. Se un punto luminoso è posto in L, ognuna delle due parti del biprisma devia la luce che su di essa arriva dal punto L, e tutto avviene al di là come se i due fasci deviati prendano origine da due punti P e P' distinti e vicini, che sono le immagini di L fornite dai due prismi costituenti il biprisma.

Semi-lenti di Billet. — Una lente convergente è divisa (Fig. 263) in due metà, le

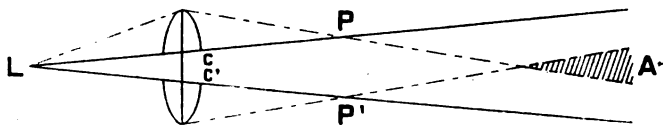
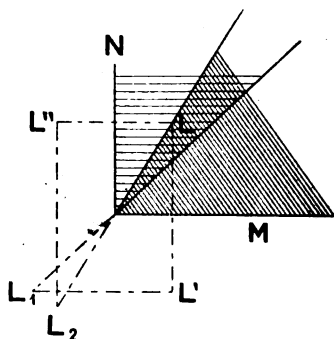



Fig. 263.

quali danno di un punto luminoso L, posto da una parte del sistema, due immagini P, P'. Queste sono punti di partenza di due fasci luminosi che ad una certa distanza si sovrappongono e danno su di uno schermo frangie di interferenza. L'essere reali le due immagini P, P' dalle quali partono i due fasci interferenti, presenta il vantaggio di potere agire su uno solo di essi col fargli, ad esempio, attraversare una lamina trasparente.

Fig. 264.

Specchi di Michelson e prisma Lippmann. — Se due specchi (Fig. 264) formano un angolo retto, si ottiene di un punto L un sistema di tre immagini, tale che una di queste può ritenersi doppia, perchè dovuta alla sovrapposizione delle immagini che delle prime due immagini L' ed L'' danno i due specchi.

Se l'angolo dei due specchi è leggermente inferiore a 90° le due immagini sovrapposte si scindono nelle due L_1 ed L_2. I fasci luminosi corrispondenti a queste due immagini hanno una parte comune, nella quale si possono osservare le frangie.

Si possono sostituire i due specchi con un prisma a riflessione totale, come ha suggerito Lippmann. I raggi cadono perpendicolarmente alla faccia ipotenusa ed escono attraverso alla stessa, dopo aver subìto sulle altre due facce due riflessioni totali. Se l'angolo del prisma è un poco inferiore a 90°, si ottengono delle frangie nella parte comune ai due fasci.

§ 233. **I battimenti luminosi.** — A proposito della interferenza delle onde sonore considerammo il fenomeno dei *battimenti*, che può ritenersi fenomeno di composizione di vibrazioni parallele ma aventi periodo diverso, laddove i fatti di interferenza ordinaria si riducono a fenomeni di composizione di vibrazioni parallele e dello stesso periodo.

Indicammo la maniera di produrli e le modalità di loro percezione da parte dell'orecchio, nonchè la manifestazione loro nella esperienza della tela del Righi.

Orbene, anche colle vibrazioni luminose si possono realizzare i battimenti come fece nel 1882 il Righi.

Altra forma di esperienza comprovante i battimenti luminosi eseguì di poi lo stesso Righi nella realizzazione degli anelli di Newton (§ 235) in movimento.

§ 234. **Colori delle lamine sottili.** — Quando un fascio di luce monocromatica colpisce una lamina trasparente sottile, una parte della luce viene riflessa dalla prima superficie della lamina; e della luce che passa un'altra parte viene riflessa dalla seconda faccia interna. Quest'ultima esce ancora dalla prima superficie e forma un altro sistema di onde che può arrivare all'occhio nella stessa direzione di quello che risulta dalla prima riflessione. Inoltre essa sarà in ritardo rispetto alla porzione soltanto riflessa che le si sovrappone, per avere attraversato la lamina andando e venendo. Per giunta si dovrà verificare, generalmente parlando, un ritardo di una semi-onda per il cambiamento di segno nella riflessione alla prima od alla seconda superficie. Si sa difatti che si verifica la riflessione con cambiamento di segno quando si passi da un mezzo meno denso ad uno più denso, e senza cambiamento di segno nel caso opposto. La cosa fu considerata anche in acustica.

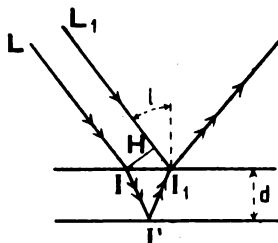



Fig. 265.

Allora se i due raggi LI ed L_1I_1 sovrapponentisi in I_1M saranno in corcordanza di fase, la lamina apparirà risplendente. Se saranno invece in discordanza di fase, si avrà estinzione di luce e la lamina apparirà nera. Se non si avrà nè perfetta corcondanza nè perfetta discordanza, la lamina apparirà più o meno splendente.

Quando poi la lamina abbia uno spessore vario, le sue differenti parti appariranno splendenti od oscure a seconda che lo spessore darà luogo alla concordanza o alla discordanza dei raggi sovrapponentisi.

Osservando la lamina per trasparenza si ha il fenomeno complementare di quello precedentemente considerato, perchè se ancora è la stessa la differenza di cammino dei raggi, non vi è in questo caso il ritardo di una semi-onda per riflessione.

Se la lamina dunque è oscura osservata per riflessione, è luminosa qualora la si osservi per trasparenza.

Con luce bianca interferiscono quei raggi che si sovrappongono in opposizione di fase e la lamina apparisce colorata per la luce composta degli altri. Variando l'inclinazione dei raggi varierà la colorazione (sempre dovuta a luce composta e non monocromatica); e la lamina osservata per trasparenza mostrerà le luci complementari di quella che mostra osservata per riflessione.

Si debbono al fenomeno ora considerato della colorazione delle lamine sottili, i colori iridescenti che presentano le fessure prodotte per fratture interne nei corpi cristallizzati, i colori cangianti delle ali di molti insetti, quelli delle bolle di sapone con strato liquido ridotto in sufficiente sottigliezza, i colori che appariscono nell'olio ed in altri liquidi allorchè si distendono in strati sottili; i colori che appariscono alla superficie dell'acciaio temprato, nelle serie di piombo ecc.

§ 235. **Gli anelli colorati del Newton.** — Una particolare manifestazione della colorazione delle lamine sottili si ha nel bel fenomeno degli anelli colorati del Newton ottenuti ponendo sulla superficie curva di una lente piano-convessa ABC una lastrina piana di vetro, o viceversa. Tali anelli sono in generale costituiti da curve con-

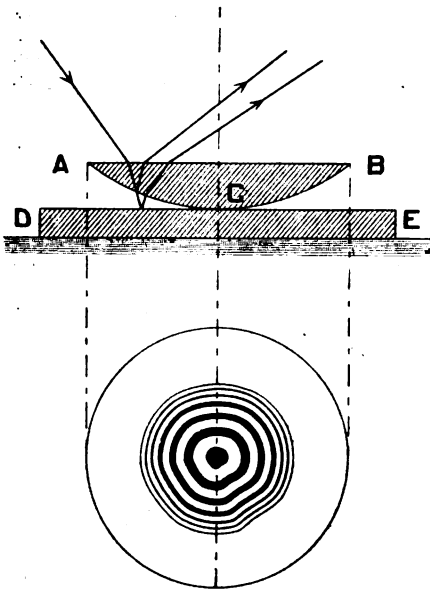



Fig. 266.

centriche irregolari (Fig. 266) ma disponendo tutto ben simmetricamente assumono rigorosamente la forma circolare.

Lo strato d'aria compreso fra il vetro piano *DE* e la superficie curva *ABC* della lente è uno strato a grossezza variabile. La luce subisce qui fra le altre due riflessioni, una nel passare dal vetro *DE* all'aria, l'altra nel passare dall'aria alla superficie *AB*, e quest'ultima è con cambiamento di

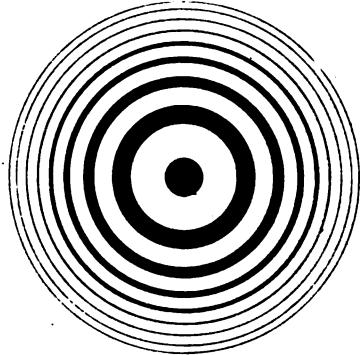



Fig. 267.

segni. Quindi per un fascio incidente normale, il ritardo del secondo fascio riflesso rispetto al primo sarà $\frac{\lambda}{2}$ più il doppio spazio percorso nell'attraversare lo strato d'aria nell'andare e nel tornarvi.

Facendo perciò cadere nel sistema un fascio di luce semplice, nel punto di contatto, guardando per riflessione, si vede un cerchietto nero. Tutt'intorno si forma una serie di anelli brillanti separati gli uni dagli altri da anelli oscuri. Essi appariscono di più in più vicini gli

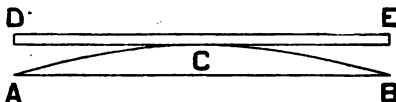



Fig. 268.

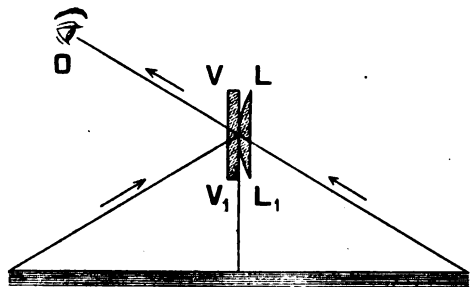



Fig. 269.

uni agli altri coll'aumentare della distanza dal punto di contatto perchè corrispondentemente si ingrossa lo strato d'aria. Confrontando le apparenze che si hanno con le diverse luci semplici si nota che i diametri degli anelli crescono o diminuiscono con le lunghezze d'onda corrispondenti a tali luci.

Usando luce bianca gli anelli splendenti si mostrano colorati, perchè là dove si formerebbe un anello oscuro per una delle luci componenti si sovrappongono quelli più o meno chiari delle altre luci.

Se invece di osservare per riflessione, si esamina per trasparenza si vede un sistema di anelli simili. Essi però sono meno luminosi e la loro luce è di colore complementare; con una luce omogenea i diametri degli anelli neri corrispondono a quelli che hanno dall'altra parte i luminosi. Questo nuovo sistema di anelli risulta, come si è detto, dalla interferenza della luce trasmessa direttamente coll'altra che viene pure trasmessa, ma che ha subìto due riflessioni nelle facce che limitano la strato d'aria. Gli anelli oscuri si formano dove la grossezza *s* dello strato è un multiplo pari di $\frac{\lambda}{4}$, ed i colorati dove tale grossezza è un multiplo dispari di $\frac{\lambda}{4}$ e questo per riflessione.

Riferendoci difatti ai punti pei quali la grossezza dello strato d'aria interposto tra i due vetri è s, sarà $2s$ il cammino che il raggio riflesso contro la superficie curva AB percorre di più che il raggio riflesso alla prima superficie di detto strato; e pel cangiamento di segno subito nella velocità, vi sarà concordanza perfetta allora che si avrà

$$2s + \frac{\lambda}{2} = 2n \frac{\lambda}{2} \quad \text{ossia:} \quad s = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}$$

e vi sarà discordanza quando invece si avrà

$$2s + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{ossia:} \quad s = 2n \frac{\lambda}{4}.$$

Osservando per trasparenza si avranno

$$\text{anelli splendenti per } s = 2n \frac{\lambda}{4} \qquad (59)$$

$$\text{ed anelli oscuri per } s = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}. \qquad (60)$$

Misurando mediante un oculare munito di reticolo che si sposti con movimento micrometrico, i diametri degli anelli chiari e oscuri, si verifica la legge seguente dovuta al Newton: *i quadrati costruiti sui raggi degli anelli chiari stanno fra loro come i numeri dispari, e i quadrati dei raggi degli anelli oscuri sono nella ragione dei numeri pari.* È facile dimostrare che anche gli spessori della lamina d'aria corrispondenti ai successivi anelli chiari e oscuri crescono secondo la indicata progressione.

DIFFRAZIONE.

§ 236. **Fenomeni di diffrazione.** — Newton, che fu oppositore della teoria ondulatoria della luce obiettava che in base a questa le ombre non potrebbero esistere, perchè le onde girando attorno ai corpi opachi scuoterebbero l'etere situato al di dietro, come le onde del mare incontrando la punta di uno scoglio la contornano e si propagano dietro di essa. Secondo lui tale fatto colla luce non aveva luogo. In realtà si verifica, sebbene nei casi ordinari sia mascherata dall'azione dell'interferenza; e per essa accade che l'ombra geometrica differisce alquanto dall'ombra reale. Vediamo intanto come in base alla teoria ondulatoria tale fenomeno (al quale si accennò nel § 224) *detto di diffrazione* debba verificarsi e si verifichi. A tal fine ci riferiremo a vari casi sperimentali — i principali — di sua manifestazione.

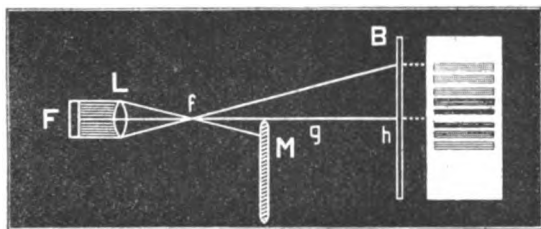



Fig. 270.

Caso di uno schermo opaco indefinito a bordo rettilineo. — Per una stretta fenditura F praticata in una parete di una camera buia si faccia entrare un fascio di luce verde, ad esempio. Un lente L a corto fuoco concentri quel fascio in f e un diaframma opaco M a margini sottili intercetti al di là del fuoco la metà del fascio luminoso, mentre l'altra metà vada a cadere sopra uno schermo B posto di fronte alla fessura. Il limite dell'ombra proiettata dal diaframma opaco sullo schermo sembrerebbe che dovesse essere indicato nella retta fgh; ma in realtà sullo schermo, si veggono al di sopra di fgh e al disotto, tanto dalla parte che dovrebbe essere uniformemente illuminata come dalla parte che dovrebbe essere in ombra, frangie oscure e brillanti rispettivamente, fra loro parallele. Tali frangie dette di diffrazione a partire dalla direzione della fgh si indeboliscono gradatamente fino a scomparire.

Rappresentiamo la considerata fenditura luminosa, supposta normale al piano della figura con S. Da essa partiranno onde cilindriche una delle quali abbia per sezione nel piano della figura l'arco di circolo aa'. DC sia la sezione che col piano della figura fa un piano opaco il quale tocca in D la superficie dell'onda ed $S'H$ sia la sezione di un'altra

superficie opaca perpendicolare in O al raggio SD prolungato. Cerchiamo di prevedere le condizioni di illuminazione dei diversi punti di $S'H$.

Riferiamoci al punto O, e applichiamo all'onda aa' rispetto ad esso il procedimento di graduazione considerato per l'onda sferica nel § 224. Avremo perciò sull'arco Da diverse parti De, ef, fg, gh, hi ecc. tali che la differenza tra OD ed Oe, tra Oe ed Of, tra Of ed Og ecc. siano la metà di una lunghezza d'onda; per ciò che si è detto della interferenza della luce, l'illuminazione prodotta sul punto O dell'archetto luminoso De sarà in parte estinta da quella che produrrebbe l'archetto ef, e quella prodotta dall'archetto fg sarà in parte estinta da quella che produrrebbe l'archetto seguente gh, e così via via. Chiamando i_1, i_2, i_3, i_4 .... le illuminazioni del punto O, per parte del primo, del secondo, del terzo ecc. di quegli archetti, potremo rappresentare l'illuminazione totale prodotta in O colla somma $(i_1 - i_2) + (i_3 - i_4) + (i_5 - i_6)$ + ... somma che rappresenteremo con L.

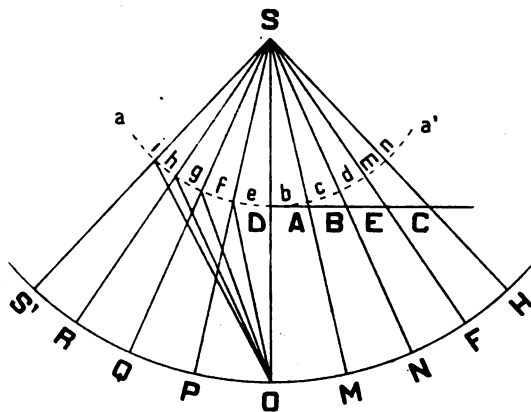



Fig. 271.

In questa somma le differenze $(i_1 - i_2)$, $(i_3 - i_4)$ .... costituiscono una serie decrescente come è una serie decrescente i_1, i_2, i_3 .... perchè illuminazioni dovute a fasci convergenti aventi sezioni decresenti ad uguale distanza da O. Se non ci fosse lo schermo opaco O riceverebbe dall'arco mascherato tanta luce quanta ne riceve da Da e quindi per il fatto dello schermo, O riceve metà luce di quella che riceverebbe se questo non ci fosse, e che, in base a quanto si disse nel § 224, corrisponderebbe all'effetto su O di una semi-zona elementare avente per centro il punto D.

Conducendo per S e per e il raggio Se sino ad incontrare $S'H$ in P e rifacendo la graduazione dell'onda alla solita maniera, sarebbe facile vedere che la luce ricevuta da P per gli elementi al di là di e è L e quella ricevuta dall'elemento omologo nella nuova graduazione a cb è i_1. In tutto quindi P riceve una quantità di luce $L + i$. Analogamente operando con raggi Sf, Sg, Sh, Si .... si potrebbe concludere che

in O	l'illuminazione è	L
in P	»	$L + i_1$
in Q	»	$L + (i_1 - i_2)$
in R	»	$L + (i_1 - i_2) + i_3$
in S'	»	$L + (i_1 - i_2) + (i_3 - i_4)$.

E cioè che in P l'illuminazione è maggiore che in O, in Q minore che in R, in S' minore che in R .... le differenze affievolendosi grado grado sino a non apparire più sensibili all'occhio (ciò per quanto dicemmo sulle serie i_1, i_2, i_3 .... $(i_1 - i_2)$, $(i_3 - i_4)$ ....

Per la graduazione già fatta dell'onda aa', avremo diviso anche l'arco Da' nelle parti Db, bc, cd ecc. uguali rispettivamente a De, ef, fg ecc. Prolungando i raggi bS, Sc, Sd .... fino ad incontrare $S'H$ in M, N, F con ragionamenti analoghi ai precedenti si trova facilmente, che, quando il piano opaco DC cominciasse in b, l'illuminazione in M sarebbe L, e perciò cominciando detto piano in D, l'illuminazione in M sarà $L - i_1$: che quando il piano opaco cominciasse in c, l'illuminazione in N sarebbe L, e perciò cominciando in D, sarà $L - (i_1 - i_2)$: che quando il piano opaco cominciasse in d, l'illuminazione in F sarebbe L, e cominciando in D, sarà $L - (i_1 - i_2) - i_3$ ecc. Quindi nella parte OH si avrà che

in O	l'illuminazione è	L
in M	»	$L - i_1$
in N	»	$L - (i_1 - i_2)$
in F	»	$L - (i_1 - i_2) - i_3$
in H	»	$L - (i_1 - i_2) - (i_3 - i_4)$

. . . .

Quindi il punto M sarà meno illuminato di O, il punto N più di M, il punto F meno di N ecc.; e ciò in modo che le differenze di luce vadano diminuendo sempre più coll'allontanarsi da O, finchè tali differenze ad una certa distanza non riesciranno più sensibili.

Sul diaframma opaco rappresentato in sezione da $S'H$ si dovrà quindi avere per parte della sorgente lineare rappresentata da S ed in conseguenza del diaframma rappresentato da DC: 1° nella parte $S'O$, cominciando da O fino ad una certa distanza delle frangie successive una meno una più illuminata con differenze di luci sempre decrescenti; 2° nella parte OH, su cui cade l'ombra di DC, cominciando dallo stesso O e fino ad una certa distanza, delle frangie successive una più una meno oscura anche qui con differenze di oscurità sempre decrescenti. Analogamente avverrà in un diaframma piano passante per O e normale ad SO. I punti di minimo sono quelli per i quali la differenza delle distanze di essi dal polo rispettivo sull'onda e dal punto D sia di un numero pari di mezze lunghezze d'onda, cioè uguale a

$$2n\frac{\lambda}{2}.$$

I punti di massimo saranno invece quelli per i quali la indicata differenza sia di un numero dispari di mezza lunghezza d'onda, sia cioè uguale a

$$(2n+1)\frac{\lambda}{2}.$$

Se con x si indica la distanza fra un punto M di minimo ed il punto O, con s la lunghezza dell'arco che va dal polo di M a D, con a il raggio dell'onda aa' e con b la distanza di M dal proprio polo, si ha sensibilmente:

$$x = \sqrt{\frac{b(a+b)\lambda}{2a}}\,\sqrt{4n}. \qquad (61)$$

Questa formola conduce alle leggi seguenti:

1. Le distanze di due minimi successivi, proporzionali a $\sqrt{n+1}-\sqrt{n}$ vanno diminuendo a misura che n aumenta. I minimi, come del resto i massimi, vanno avvicinandosi fra loro quando ci si allontana dai limiti dell'ombra geometrica; le frangie si vanno chiudendo.
2. Le frangie diventano più larghe quando a si diminuisce.
3. Le frangie si restringono se b si diminuisce.

Questo fenomeno che abbiamo previsto in base alla teoria delle ondulazioni è appunto quella manifestazione più sopra considerata sperimentalmente della *diffrazione della luce*. Se si adoprano luci di varia lunghezza d'onda si nota che i minimi ed i massimi di luce vanno allontanandosi da O col crescere del valore della lunghezza d'onda.

Questa influenza della lunghezza d'onda sulla posizione dei minimi e dei massimi di luce si fa sentire nei fenomeni di diffrazione come in quelli di interferenza per introdurre colorazioni varie nella manifestazione dei fenomeni di diffrazione allorchè si usi luce bianca invece che monocromatica.

Caso di uno schermo opaco ristretto ed a bordi rettilinei e paralleli. — Se in posto del diaframma opaco M si tende parallelo alla fessura un sottile filo metallico, dove dovrebbe aversi l'ombra del filo, lo schermo riesce illuminato con alcune frangie oscure e brillanti, e al di qua e al di là ci sono pure frangie alternativamente oscure ed illuminate. Le prime diconsi poi frangie *interne*, *esterne* le seconde; ed anche in questi casi, più la luce che entra per la fessura è rifrangibile, le frangie sono più strette, e sono iridescenti se la luce è bianca.

Caso di una stretta fenditura a bordi rettilinei e paralleli. — Poniamo davanti ad una sorgente luminosa viva lineare e monocromatica una fenditura verticale parallela alla linea luminosa di larghezza variabile, e si collochi una lastra opaca a distanza. Osservando ciò che si verifica sullo schermo opaco si nota ai lati di una frangia luminosa centrale e rettangolare una serie di frangie luminose a luminosità decrescente separate l'una dall'altra da intervalli oscuri. La larghezza poi di queste frangie varia colla larghezza della fenditura: quanto più questa è larga, tanto più strette sono le frangie, mentre invece sono tanto più larghe quanto più la fenditura è stretta. Varia anche colla rifrangibilità della luce, diminuendo col crescere della rifrangibilità. Cerchiamo di renderci conto di tutto ciò.

Sia AP la larghezza della fenditura. Allorchè l'onda luminosa la raggiunge, tutti i suoi punti divengono centri di onde che si propagano sfericamente. Sia ST lo schermo

o la retina di un osservatore rivolto verso la fenditura. Al punto O che è sulla normale al punto di mezzo C della fenditura, le onde provenienti ad un dato istante dai diversi punti di AP, stante la strettezza di AP, si potrà ritenere che giungano contemporaneamente in O, e quindi che giungano in concordanza senza che vi abbia per interferenza alcuna diminuzione di luce. Si avrà quindi una frangia luminosa centrale. Consideriamo ora un altro punto R della retina a cui le onde che vengono dai bordi A, e P della fenditura differiscano tra loro di una lunghezza d'onda, preso Rm uguale ad RP, sarà Am una lunghezza d'onda, e condotta da C la Cn parallela a Pm, sarà An una mezza lunghezza d'onda. Le onde perciò che vengono ad R dai punti successivi che sono tra P e C cominciando da P, saranno in anticipo di una semi-ondulazione rispetto a quelle che vengono dai punti successivi che sono tra C ed A cominciando da C: le prime però interferiranno rispettivamente colle seconde, ed il punto R dello schermo o della retina sarà nell'oscurità.

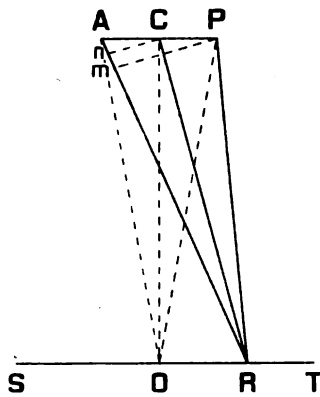



Fig. 272.

Pel punto tra O ed R in cui si verifica che le distanze dai due bordi A e P differiscono di una semi-ondulazione, non vi può essere che una distruzione parziale di luce, non essendovi per interferenza distruzione completa che dei raggi corrispondenti ai punti estremi.

In un punto dello schermo tale che la direzione della luce che vi si dirige porti per i raggi estremi una differenza di cammino di tre mezze lunghezze d'onda ossia di $\frac{3\lambda}{2}$ vi sarà luce perchè se s'immagina divisa la larghezza della fenditura in tre parti uguali, due di esse si compensano e la terza sola sarà efficace. Per conseguenza in questa direzione obliqua si ha una seconda immagine luminosa dovuta ad una terza parte del fascio e quindi più debole quella centrale non diffratta. Per un punto dello schermo rispetto al quale la differenza di distanza dei due estremi A e P riesca uguale a quattro mezze lunghezze d'onda, si produce una seconda estinzione del fascio intero, perchè in tal caso esso può essere diviso in quattro parti, che prese a due a due si estinguono l'una con l'altra; un secondo spazio oscuro corrisponderà per conseguenza sullo schermo o sulla retina all'obliquità che produce questa differenza. Si può continuare così indefinitamente; il risultato generale è che ove la direzione della luce produce una differenza di cammino dei raggi estremi uguale ad un numero pari di mezze lunghezze d'onda, si avrà un'estinzione completa; mentre là dove la differenza marginale suddetta corrisponde ad un numero dispari di mezze lunghezze d'onda si avrà un'estinzione parziale. Dall'altra parte della fenditura le cose succedono in modo simmetrico.

Si intuisce facilmente come alle luci di maggiore rifrangibilità debbano corrispondere strisce luminose ed oscure più strette; infatti quando più corte saranno le lunghezze d'onda tanto più riesciranno vicini i punti successivi dello schermo pei quali la differenza di lunghezza dei raggi che vanno ad essi dai due bordi corrisponde ad una mezza lunghezza d'onda. Se per conseguenza è della luce bianca che passa attraverso alla fenditura, i diversi colori non saranno sovrapposti, e in luogo d'una serie di frangie monocromatiche, separate le une dalle altre da intervalli oscuri, si avrà una serie di spettri colorati posti a fianco l'uno dell'altro.

Si intuisce anche come debbano più allargarsi le strisce luminose e gli spazi oscuri, quanto più la fenditura AP è ristretta, per essere in tal caso più distanti tra loro i successivi punti della retina ai quali corrisponderanno le differenze dei raggi che vanno ad A e P uguali ad una semi-ondulazione. Va notato che le apparenze pei punti dei varii tratti *continui* dello schermo debbono variare continuamente, passando per gradi dalla luce non difratta che si ha per es. in O all'oscurità perfetta che si ha in R.

Rappresentiamo con θ l'angolo formato dalla direzione nella quale si ha il fatto di diffrazione con la direzione normale alla fenditura, l'angolo cioè formato dalla CR (sensibilmente corrispondente alla direzione della luce partente da tutti i punti di AP, data la ristrettezza della fenditura rispetto alla grande distanza dello schermo) colla CO, che sensibilmente (per la ristrettezza della fenditura in confronto colla distanza dello schermo) può ritenersi uguale ad ACn o ad APm. Chiamando tale angolo, angolo di diffrazione, si può dire:

1° Gli angoli di diffrazione θ che corrispondono ai minimi sono dati dalla relazione:

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{n\lambda}{a}. \qquad (62)$$

dove a rappresenta la larghezza della fenditura ed n un numero intero.

2° Quelli corrispondenti ai massimi sono invece dati dalla relazione:

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{(2n+1)\frac{\lambda}{2}}{a}. \qquad (63)$$

Se la differenza delle distanze dai punti A e P di un punto limite dell'ombra geometrica proiettata dalla sorgente del corpo opaco che limita la fenditura è uguale od inferiore a $\frac{\lambda}{2}$, la frangia centrale è tutta luminosa. Ma se la indicata differenza è un multiplo di $\frac{\lambda}{2}$ si notano delle frangie anche all'interno della frangia luminosa centrale, e nel punto medio di questa si avrà una frangia oscura od una luminosa a seconda che la metà della porzione di superficie d'onda appoggiantesi su AP contiene un numero pari o dispari di zone ottenute graduando l'onda coll'assumere solo il punto medio della indicata porzione di superficie d'onda. In altre parole se la differenza delle distanze da questo punto medio e da un punto A o P, dal punto medio O della frangia centrale è data da $(2k+1)\frac{\lambda}{2}$ si ha in O un massimo. Se invece tale differenza è data da $2k\frac{\lambda}{2}$ si ha un minimo.

Variando, forma, dimensione e disposizione delle piccole aperture si possono ottenere variatissimi effetti.

Caso di un foro circolare e di uno schermo circolare. — Si possono produrre fenomeni di diffrazione usando un foro circolare od uno schermo circolare. Bisogna a tal fine usare come sorgente un punto luminoso situato sulla normale al foro od allo schermo. Si osservano apparenze analoghe a quelle considerate nei casi precedenti. Nel caso del foro circolare le frangie sono circolari e l'intensità della parte centrale può essere qualunque. Nel caso dello schermo le frangie sono pure circolari, ma il centro è sempre una regione di massimo.

§ 237. **Potere separatore degli strumenti ottici.** — In conseguenza delle loro dimensioni le lenti obbiettive degli strumenti ottici limitano assai le onde che rifrangono e quindi danno origine a fenomeni di diffrazione in virtù dei quali l'immagine di un punto non è rigorosamente un punto, ma un piccolo occhietto luminoso circondato da anelli di diffrazione alternativamente oscuri e luminosi che vanno rapidamente estinguendo, a partire dalla regione centrale, le loro differenze di intensità.

Si dimostra ad esempio che per un cannocchiale astronomico, *il raggio* r *della chiazza centrale è proporzionale alla lunghezza d'onda* λ *della luce monocromatica adoperata, alla distanza focale* F *dell'obbiettivo, ed in ragione inversa del diametro di apertura* D *dell'obbiettivo.* Si ha cioè

$$r = \frac{\lambda F}{D}. \qquad (64)$$

Ne segue che per ottenere separate le immagini di due punti vicini occorre che le chiazze centrali delle corrispondenti immagini non cadano troppo l'una sull'altra. A tal fine occorre che la distanza dei centri di tali chiazze sia almeno uguale al loro raggio r. L'angolo α, che la indicata distanza sottende dal centro ottico dell'obbiettivo, ha per espressione:

$$\alpha = \frac{r}{F} = \frac{\lambda}{D},$$

e misura ciò che si chiama il *potere separatore* dell'obbiettivo. Più è piccolo per un determinato obbiettivo, migliore è questo obbiettivo.

Siccome poi il potere separatore dell'occhio è di circa un minuto, bisogna naturalmente associare all'obbiettivo un oculare tale che i due punti nella immagine osservata dall'occhio sieno veduti sotto un angolo di almeno un minuto.

§ 238. **Reticoli.** — Degno di nota è il comportamento dei cosidetti *reticoli* come quelli formati dalle minutissime striature che si tracciano col diamante sul vetro o sui

metalli nel fare i micrometri, per modo da formare in ogni millimetro 100, 200, 1000 e più divisioni alternativamente oscure e lucenti.

Per la regolarità del fenomeno osservato per la prima volta dal Fraunhofer occorre che la lunghezza dei tratti lucenti sia uguale a quella dei tratti oscuri e che tutti i tratti sieno fra loro paralleli.

Orbene, se si guarda ad occhio nudo o con un cannocchiale una linea luminosa attraverso ad un reticolo, su una linea perpendicolare alla direzione comune delle strie, ovvero si guarda la luce quale giunge su uno schermo opaco, si vede apparire una serie di spettri che presentano il rosso al di fuori, il violetto al di dentro, e sono simmetricamente disposti da una parte e dall'altra della linea che congiunge l'occhio alla sorgente passando pel mezzo del reticolo.

Più precisamente diremo che ai due lati di una linea luminosa centrale o si hanno due spazi oscuri che separano due spettri $V_1 R_1$ con il violetto all'interno e il rosso all'esterno (Fig. 274); vengono di poi due altri spazi oscuri più ristretti, e due serie di spettri $V_2 R_2$, $V_3 R_3$ che in parte si sovrappongono. Gli spettri $V_1 R_1$ sono detti *spettri del 1° ordine*, quelli $V_2 R_2$ *spettri del 2° ordine*, e così di seguito.

Fig. 273.

Tutti questi spettri si dicono *spettri di diffrazione*.

Per essi si ha che i seni degli angoli di deviazione delle varie luci sono proporzionali alle lunghezze d'onda. La dispersione è in essi inversa di quella prismatica, ed è indipendente dalla materia. Inoltre gli spettri di diffrazione, a differenza di quelli prismatici, sono simili fra di loro.

Per rendersi elementarmente conto del fenomeno considereremo le singole coppie (elementi) formate (Fig. 273) da un tratto oscuro $A_1 B_1$ e da un attiguo lucente $B_1 A_2$.

Al centro del reticolo si avrà direttamente un fascio di luce bianca, ma dai lati i raggi verranno all'occhio obliquamente. Ad una certa distanza l'obliquità dei raggi sarà tale che dall'elemento considerato *supposto tutto* lucente, i raggi stessi verrebbero all'occhio con differenza di cammino pari ad una lunghezza d'onda della luce violetta ad esempio. Se fosse veramente lucente anche la parte oscura dell'elemento, l'occhio riceverebbe dall'elemento due fasci discordanti perchè ad ogni raggio ne corrisponderebbe sempre un altro con differenza di cammino di mezza lunghezza d'onda e quindi l'elemento apparirebbe oscuro. Ma mancando effettivamente nel reticolo una metà dell'elemento, l'occhio riceve dall'altra metà aperta un fascio attivo di luce violetta.

Se rappresentiamo con a la larghezza di ogni tratto lucente e in b quella di ogni tratto oscuro, si avrà evidentemente per ogni luce di lunghezza d'onda λ un massimo nella direzione θ se:

$$(a + b) \text{ sen } \theta = n\lambda, \qquad (65)$$

n essendo un numero intero.

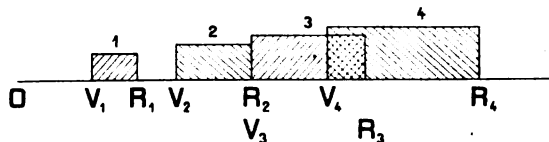
Per poco che ci si allontani dalla direzione θ, il massimo scompare, come sarebbe facile vedere.

Rappresentando con N il numero di elementi (tratto lucente col vicino tratto oscuro) per millimetro si ha $N(a + b) = 1$ e la relazione precedente che dà i massimi diventa

$$\text{sen } \theta = nN\lambda. \qquad (66)$$

Siccome poi il fatto successivamente avverrà a partire dalla luce violetta per tutte le luci costituenti la luce bianca e ciò in successione col crescere della lunghezza d'onda, si osserverà lo spettro.

Fig. 274.

Il primo spettro si avrà per $n = 1$; ma la cosa si ripete più lontano dal centro, là dove le differenze di cammino dei raggi dagli estremi di un elemento allo schermo sieno un numero intero di lunghezze d'onda. Si formeranno cioè successivi spettri, che peraltro sono sovrapposti parzialmente e sempre più indeboliscono.

In queste considerazioni non abbiamo tenuto conto dell'azione delle fenditure considerate isolatamente. Ora, è evidente che un massimo non potrà prodursi in una direzione θ se ogni fenditura presa isolatamente dà in questa direzione una intensità nulla, ciò che ha luogo per

$$a \operatorname{sen} \theta = n'\lambda. \qquad (67)$$

I massimi scompariranno quindi per le direzioni θ che verificano simultaneamente le equazioni (65) e (67), vale a dire tali che

$$\frac{a+b}{a} = \frac{n}{n'}$$

o

$$n = \frac{a+b}{a} n'.$$

In particolare, se $b = a$, per $n = 2n'$ vale a dire per tutti i valori pari di n il massimo non esite; se $b = 2a$, scompare per $n = 3n'$ vale a dire per tutti i valori di n multipli di 3, e così via.

Riteniamo però che se la lunghezza dei tratti lucenti è uguale a quella dei tratti oscuri, gli spettri si hanno là dove le differenze di cammino dei raggi dagli estremi di un elemento risulta di 1, 3, 5 ... ecc. lunghezze d'onda.

Il primo spettro è, con buona illuminazione e con reticolo a buon numero di elementi molto *puro*.

Si consideri difatti nella direzione lungo la quale si ha la radiazione di lunghezza d'onda λ, la radiazione di lunghezza d'onda λ' prossima a λ, tale che $\lambda = \lambda' + \frac{1}{100}\lambda'$. I raggi della cinquantesima fenditura presenteranno per rapporto a quelli della prima una differenza di cammino di 50 λ o di 50 $\lambda' + \frac{\lambda'}{2}$, cosicchè interferiranno completamente coi primi e la radiazione di lunghezza d'onda λ' inviata dalle 50 prime fenditure nella direzione sarà θ distrutta dalle 50 fenditure seguenti, e così, di seguito. Non resterà dunque in totale che la luce emessa da un residuo di meno di 50 fenditure, ciò che è del tutto trascurabile se il reticolo contiene qualche migliaio di elementi. Con un reticolo di 1000 elementi al millimetro, $a + b =$ mm. $\frac{1}{1000}$ ed il primo spettro ha una larghezza di 40 cm. alla distanza di 2 metri.

Lo spettro di diffrazione prodotto da un reticolo per la proprietà sua secondo la quale *il seno della deviazione di una radiazione è proporzionale alla lunghezza d'onda di questa*, vien detto *spettro normale*.

Misura delle lunghezze d'onda. — Invece di ricevere gli spettri su uno schermo si ponga il reticolo nel centro di un cerchio diviso, lo si illumini normalmente da una parte e si ricevano dall'altro lato i raggi obliqui in un cannocchiale mobile radialmente attorno al centro del cerchio. Se col cannocchiale si osserva successivamente una riga determinata di due spettri simmetrici di terz'ordine; dalla metà dello spostamento si avrà θ, e la formola

$$(a + b) \operatorname{sen} \theta = k\lambda$$

nella quale si faccia $k = 3$, darà il valore corrispondente di λ. Questo è uno de' metodi migliori per la misura delle lunghezze d'onda.

Reticoli a riflessione. — Oltre ai detti reticoli che forniscono spettri per trasparenza, si costruiscono anche *reticoli a riflessione* solcando con finissime strie delle superficie speculari. Essi forniscono spettri di diffrazione per la luce riflessa. Celebri fra i reticoli di questa specie sono quelli del Rowland.

Fenomeni comuni analoghi a quelli presentati dai reticoli. — I fenomeni sono vari con reticoli di varia forma per varia disposizione od andamento di linee. Anche le polveri minute ed omogenee, come il pòlline di alcuni fiori, come le spore di licopodio, sopra un vetro offrono i fenomeni dei reticoli.

Guardando una fiamma lontana attraverso alle barbe delle penne di uccelli si hanno spettri come coi reticoli per trasparenza. Guardando cogli occhi socchiusi un punto luminoso attraverso i peli delle ciglia, si osserva del pari il fenomeno dei reticoli. La madre-

perla colle sue iridescenze dà il fenomeno dei reticoli di riflessione, avendo la superficie rigata di microscopiche striature.

Degne di nota particolare sono le *corone* di cui si parlerà in Meteorologia.

Doppia rifrazione e polarizzazione.

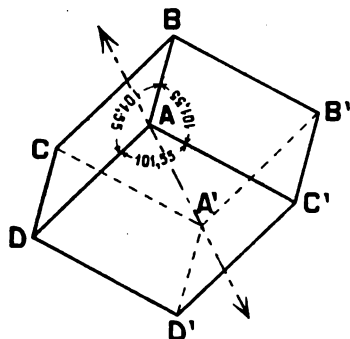



Fig. 275.

§ 239. **Doppia rifrazione.** — Indichiamo un fenomeno per la prima volta osservato nel 1669 da Erasmo Bartolino nello spato d'Islanda. Questo corpo può sfaldarsi in modo da avere gli spigoli tutti uguali, e allora risulta limitato da sei rombi uguali; si dice *romboedro*. La retta che congiunge i vertici degli angoli triedri ottusi è ugualmente inclinata sui tre spigoli e costituisce ciò che si chiama l'*asse del cristallo*. Con la sfaldatura il cristallo può dividersi in altri di figura simile e quindi ogni punto può divenire il vertice di uno dei triedri ottusi, e ogni retta parallela a quella prima considerata può prendersi per asse.

Si chiama *sezione principale* del cristallo un piano avente la direzione dell'asse e perpendicolare ad una faccia. Consideriamo uno spato che abbia la sezione principale orizzontale (ad esempio) e vi si faccia cadere normalmente su una faccia un raggio di luce. Questo, esce bipartito, una parte propagandosi sulla direzione del raggio incidente e l'altra in direzione spostata lateralmente. Nella scuola suol mettersi in evidenza la cosa operando nel modo seguente. Si proietta con una lente l'immagine di una piccola apertura L dalla quale la luce si diriga su uno spato $ABCD$. Appariscono sullo schermo due dischi luminosi S, O, invece di uno. Facendo girare lo spato attorno al raggio incidente, il raggio O resta fisso e l'altro gli gira attorno. Il raggio che sta fermo si dice *ordinario* e l'altro che ruota dicesi *straordinario*.

Fig. 276.

In questo caso del carbonato di calce si ha che per il raggio ordinario, l'indice di rifrazione è maggiore di quello del raggio straordinario.

Giova notare che altri cristalli danno pure origine a questo fenomeno detto della *doppia rifrazione*; ma, per alcuni di essi l'indice di rifrazione riferito al raggio ordinario è minore dell'indice di rifrazione del raggio straordinario. Da questo diverso comportamento ha avuto

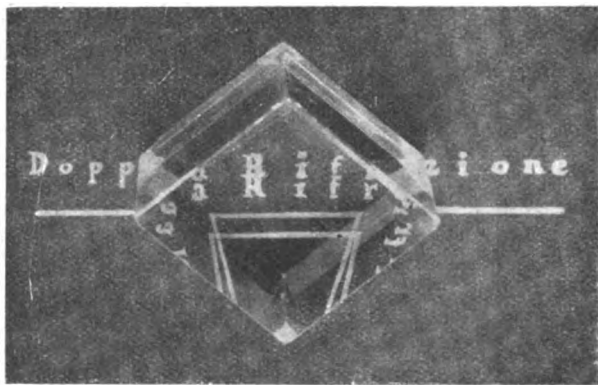
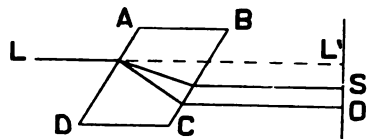
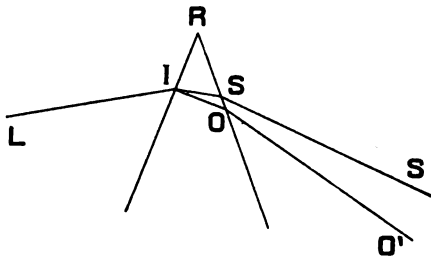



Fig. 277.

Fig. 278. - La doppia rifrazione nello spato si mostra anche foggiando questo opportunamente a prisma.

origine la distribuzione di cristalli in *positivi* e *negativi* a seconda che l'indice ordinario è minore o maggiore dell'indice straordinario. Il carbonato di calce è positivo.

In questo fenomeno il raggio ordinario segue le leggi della rifrazione, ma lo straordinario se ne allontana per il fatto che non è più verificata la legge che dice *Raggio incidente, raggio rifratto e normale, sono in un medesimo piano.*

§ 240. **Luce naturale e luce polarizzata - Polarizzazione della luce per doppia rifrazione.** — Si chiama *luce naturale* quella che proviene direttamente da una sorgente, il Sole od una lampada, senza avere subita alcuna riflessione nè alcuna rifrazione.

Fig. 279.

Si dice che *un raggio di luce è polarizzato* o è costituito da luce polarizzata quando non si comporta nella stessa maniera intorno alla direzione di propagazione o, come si dice, nei vari azimut; il che può riconoscersi col fatto che una rotazione di ciò che riceve o che fornisce il raggio attorno alla direzione di propagazione quale asse, produce una modificazione nei fenomeni luminosi osservati.

Vediamo come i due raggi rifratti forniti da uno spato sono polarizzati.

Se un raggio di luce naturale, per esempio solare, attraversa un mezzo birifrangente, i due raggi rifratti convergenti dal cristallo sono di uguale intensità. Facendo passare (Fig. 280) uno dei due raggi così rifratti per un secondo mezzo birifrangente, in generale esso verrà ancora diviso in due altri raggi ma di intensità disuguale. Sia, ad esempio, il raggio ordinario uscito dal primo mezzo quello che si fa passare sul secondo mezzo birifrangente.

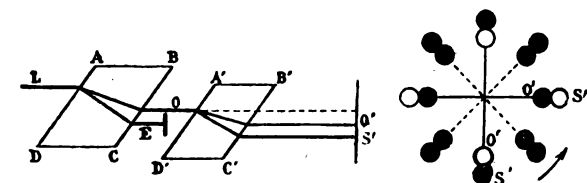
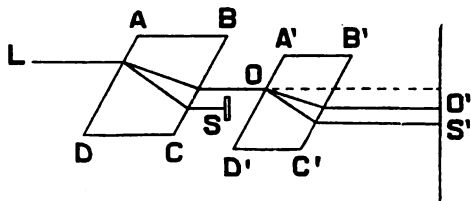



Fig. 280.

Lasciando fermo il primo dei due cristalli e facendo girare l'altro, si riconoscono i seguenti fatti rappresentati dalla Fig. 281:

1. Se le sezioni principali dei due cristalli sono parallele, il raggio ordinario attraversando il secondo cristallo non si suddivide in due, ma dà una sola immagine che è l'ordinaria.

2. Se le due sezioni sono ad angolo si ha la suddivisione del raggio in due con disuguale intensità se l'angolo è diverso da 45°.

3. Per un angolo di 45° i due raggi emergenti hanno uguale intensità.

4. Se le sezioni principali sono ad angolo retto, il raggio attraversa il secondo cristallo senza suddivisioni e dà un immagine straordinaria.

Fig. 281.

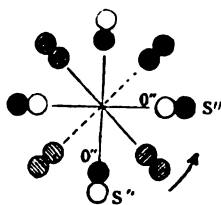
Chiamando α l'angolo delle due sezioni principali e rappresentando con O, con O' e con S' le intensità del primo raggio ordinario, del secondo raggio ordinario e del secondo raggio straordinario rispettivamente, si ha cioè (leggi di Malus):

$$O' + S' = O = \frac{1}{2} L.$$

L rappresentando l'intensità del raggio di luce naturale adoperata

$$O' = \frac{1}{2} L \cos^2\alpha \qquad (68)$$

$$S' = \frac{1}{2} L \operatorname{sen}^2\alpha. \qquad (69)$$

Quando si faccia uso del raggio straordinario si possono ottenere fatti analoghi rappresentati dalla Fig. 281.

Si hanno le medesime vicende già considerate pel caso del raggio ordinario se si usa l'avvertenza di fare ruotare il primo cristallo di un angolo di 90°. Ciò si suole esprimere dicendo che i due raggi l'ordinario e lo straordinario prodotti dal primo cristallo di spato, sono polarizzati ad angolo retto. Rappresentando con O'' e con S'' le intensità dei due raggi ordinario e straordinario corrispondente al primo raggio straordinario di intensità S, si ha:

$$O'' = \frac{1}{2} L \operatorname{sen}^2\alpha \quad , \quad S'' = \frac{1}{2} L \cos^2\alpha .$$

I fatti indicati si verificano, oltre che collo spato, con quel qualsiasi cristallo birifrangente che si impieghi.

Dalla circostanza sufficientemente messa in rilievo che i fenomeni ora considerati non dipendono che dalla grandezza assoluta dell'angolo delle due sezioni principali dei due cristalli, le proprietà dei raggi ordinari e straordinari debbono essere simmetriche rispetto alla sezione principale, ragione per cui questa fu scelta come piano di riferimento. La sezione principale di un cristallo si chiama *piano di polarizzazione del raggio ordinario* colla quale cosa si intende dire che questo raggio non si comporta alla stessa maniera in una qualsiasi direzione attorno a quella di propagazione, ma che sotto questo punto di vista il piano di polarizzazione è un piano di simmetria. E collo stesso linguaggio diremo che il piano di polarizzazione del raggio straordinario è normale alla sezione principale del cristallo, giacchè abbiamo veduto che i due raggi ordinario e straordinario dati da uno stesso cristallo sono polarizzati ad angolo retto.

Si può dunque dire, riassumendo:

Il raggio ordinario è polarizzato nel piano della sezione principale, ed il raggio straordinario in un piano a questa perpendicolare.

Lo spato, già lo si disse, non è il solo cristallo che possiede la doppia rifrazione: un gran numero di cristalli gode della stessa proprietà tanto da poter dire che nella generalità dei casi si ha la doppia rifrazione. La semplice rifrazione si ha solamente nei corpi isotropi.

Ma, in generale, salvo due o tre eccezioni, i due raggi rifratti dai cristalli birifrangenti sono vicinissimi l'uno all'altro e non si può mostrare la doppia rifrazione altro che con procedimenti indiretti. I due raggi che si ottengono da un raggio incidente sono d'altronde polarizzati come nel caso dello spato.

§ 241. **La tormalina.** — Alcuni cristalli colorati, come la tormalina, presentando il fenomeno della doppia rifrazione hanno un coefficiente di assorbimento differentissimo per il raggio ordinario e per quello straordinario; di guisa che sotto uno spessore conveniente essi assorbono interamente uno dei raggi lasciando passare l'altro. Questo è un mezzo che consente di avere in modo facile un raggio polarizzato.

La tormalina (crist. sist. esag. con asse di simmetria senaria) tagliata in lamina parallelamente all'asse e con spessore superiore ad 1 mm. assorbe interamente il raggio ordinario mentre il raggio straordinario passa. La luce colorata che traversa la lamina è polarizzata.

§ 242. **Polarizzazione per riflessione.** — La polarizzazione della luce si può ottenere anche per riflessione su di un corpo trasparente. Si può anzi dire che in generale tale riflessione polarizza in una misura più o meno forte la luce che la subisce. Vi è per ogni corpo riflettente un angolo di incidenza (*angolo di polarizzazione*) in corrispondenza del quale si ha la totale polarizzazione della luce. È quel tale angolo per cui la rifrazione si effettua per modo da dare al raggio rifratto una direzione normale al raggio riflesso.

Si ha allora $$i = 90^\circ - r$$

e siccome $$\operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r$$

ne risulta: $$\operatorname{sen} i = n \cos i$$

ossia: $$\operatorname{tang} i = n; \qquad (70)$$

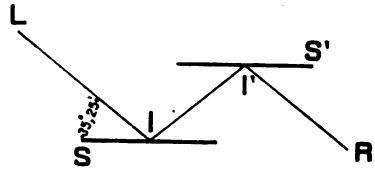
il che significa che *l'incidenza per la quale la polarizzazione è completa, ha per tangente l'indice di rifrazione della sostanza riflettente.* Ciò costituisce la legge di Brewster dalla quale può calcolarsi il valore dell'angolo di polarizzazione per la riflessione su di un corpo qualsiasi di cui si conosca l'indice di rifrazione. Per il vetro l'angolo di polarizzazione è di circa 55°. Si può basare su questa legge un metodo di misura degli indici. Il piano di polarizzazione della luce polarizzata per riflessione coincide col piano di incidenza.

La constatazione della polarizzazione per riflessione può farsi, sia per mezzo di un

nicol che riceva il raggio riflesso, sia ricorrendo ad un altro specchio che riceva il raggio riflesso dal primo. Ecco come si può operare ricorrendo ad un secondo specchio.

Immaginiamo (Fig. 282) che un raggio di luce naturale LI sia ricevuto su di una lastra di vetro per modo da formare su questa un angolo di incidenza di 54°35′ e che il raggio riflesso II' sia ricevuto a sua volta su una seconda lamina di vetro S' con un angolo di incidenza pure di 54 35′. Sia $I'R$ il raggio definitivamente riflesso che si riceva su di un conveniente schermo P. Se si fa ruotare lo specchio S' in modo che esso generi un cono intorno al raggio II', l'intensità del raggio $I'R$ non rimarrà costante ma passerà per due massimi e presenterà due minimi in corrispondenza dei quali la intensità sarà nulla. Più precisamente e più generalmente diremo che se è α l'angolo del quale si suppone ruotato lo specchio S' a partire dalla posizione di parallelismo con S, l'intensità luminosa del raggio $I'R$ è espressa dalla relazione $I = I_0 \cos^2\alpha$ nella quale I_0 è il valore della intensità nella condizione di parallelismo.

Fig. 282.

Il raggio riflesso dal primo specchio dunque non ha la stessa proprietà in tutti gli azimut: esso è polarizzato. Per giunta è polarizzato sul piano di incidenza poichè esso si comporta esattamente come si comporterebbe il raggio ordinario di un cristallo di spato disposto colla propria sezione principale parallelamente al piano di incidenza.

§ 243. **Polarizzazione per rifrazione.** — Il fascio di luce rifratto nella condizione considerata nel precedente paragrafo è polarizzato parzialmente. La quantità di luce polarizzata è corrispondente alla quantità di luce riflessa, ed *è polarizzata in un piano perpendicolare al piano di incidenza.*

È chiaro che usando invece di una sola lastra trasparente, una serie di lastre parallele costituenti quella che si dice una *pila di lastre*, le riflessioni successive sulle varie lastre aumenteranno progressivamente la quantità di luce polarizzata per rifrazione. Questa considerazione ha suggerita la costruzione di un polarizzatore a pile di lastre formato con parecchie lastre di vetro a facce parallele sovrapposte.

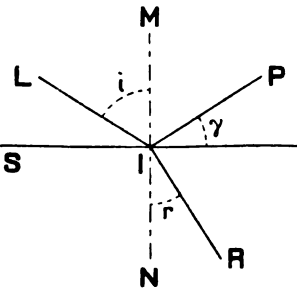



Fig. 283.

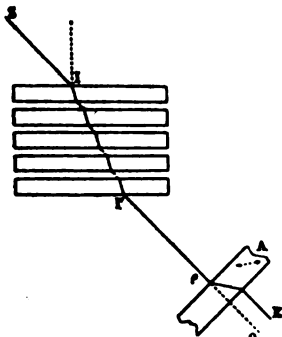



Fig. 284 - In A spato comprovante che la luce uscente dalla pila di lastre è polarizzata in un piano perpendicolare a quello di incidenza.

§ 244. **Polarizzatori - Analizzatori.** — Si chiama *polarizzatore* ogni apparecchio capace di fornire della luce polarizzata. È un polarizzatore un cristallo birifrangente, una lamina riflettente di vetro, una pila di lastre ecc.

Si chiama *analizzatore* ogni apparecchio che consenta di constatare che un fascio di luce è polarizzato.

Per tutto ciò che abbiamo veduto nei paragrafi precedenti possiamo dire che ogni polarizzatore può servire da analizzatore.

245. — **Prisma di Nicol o "Nicol".** — Un polarizzatore od analizzatore molto frequentemente usato è il cosidetto *nicol* che trae il nome dal fisico che lo ideò. Sfaldando uno spato si costruisce un parallelepipedo allungato che si taglia a metà secondo un piano passante per i due angoli ottusi e perpendicolare alla sezione principale. Si riuniscono poi le due metà con uno strato sottile di balsamo del Canadà. Poichè l'indice

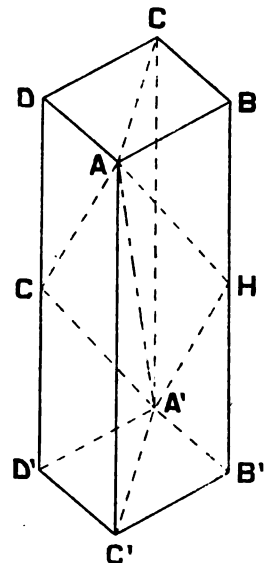



Fig. 285.

di rifrazione di questa sostanza è compreso fra l'indice ordinario e l'indice straordinario dello spato, il raggio ordinario incontra la superficie del balsamo sotto un angolo superiore all'angolo limite (dovrebbe passare in un mezzo meno denso – balsamo del Canadà) e riflettendosi totalmente è rinviato da un lato; il raggio straordinario invece può passare liberamente.

Un *nicol* (così si chiama un istrumento come questo) adunque trasmette soltanto la metà della luce incidente e quella trasmessa è totalmente polarizzata in un piano perpendicolare alla sezione principale, ossia le vibrazioni delle particelle d'etere nel raggio emergente avvengono nel piano della sezione principale.

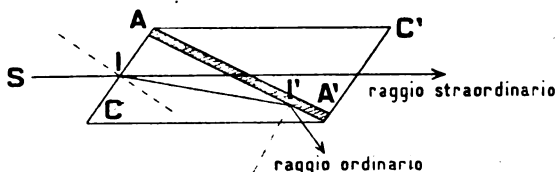



Fig. 286.

Ora supponiamo di avere un raggio polarizzato fornitoci da un nicol come quello sopradescritto. Sia *NS* la direzione del raggio polarizzato. Se disponiamo di un altro nicol simile al precedente e riceviamo il raggio *NS*, si vedrà in una certa posizione che tutta la luce del raggio *NS* passa e vedremo *campo illuminato* (e ciò capiterà quando la sezione principale del primo prisma è parallela all'altra). Ma se le sezioni principali saranno incrociate ossia tra loro a 90°, la luce verrà completamente estinta.

Allora i due nicol sono ad *estinzione*.

246. **Interferenza dei raggi polarizzati.** — La esperienza ha dimostrato:

1. Due raggi polarizzati nello stesso piano interferiscono.
2. Due raggi polarizzati in piani ortogonali non interferiscono.
3. Due raggi polarizzati in piani ortogonali e ricondotti nello stesso piano interferiscono se provengono da uno stesso raggio preventivamente polarizzato, ma non interferiscono se il raggio primitivo era naturale.
4. Due raggi polarizzati ad angolo retto, provenienti da un medesimo raggio polarizzato, e ricondotti nello stesso piano di polarizzazione, danno una frangia centrale nera o bianca secondo che il nuovo piano di polarizzazione è parallelo o perpendicolare al piano primitivo.

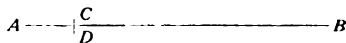
§ 247. **Le onde luminose sono trasversali.** — I fenomeni di interferenza e di diffrazione non si spiegano che supponendo la luce dovuta ad un movimento vibratorio trasmesso con velocità finita da un mezzo speciale che si è chiamato *etere*. Ma si spiegano tanto se si ammette che le vibrazioni si compiano nella direzione stessa del raggio luminoso (come le vibrazioni sonore si compiono nella direzione di propagazione del suono) quanto se si ammette che le vibrazioni si effettuino perpendicolarmente alla direzione di propagazione (come nel caso delle onde liquide o di una membrana sonora o di una lamina). I fenomeni di polarizzazione invece si spiegano solo ammettendo che le vibrazioni sieno trasversali.

Consideriamo difatti un raggio di luce polarizzata a proposito del quale abbiamo visto che possiede due piani di simmetria fra loro perpendicolari. Orbene, se le vibrazioni avvenissero nella direzione di propagazione, cioè nella direzione del raggio, tutto dovrebbe essere simmetrico intorno al raggio: ogni piano passante pel raggio sarebbe piano di simmetria e non si potrebbe spiegare la esistenza di due piani di simmetria soltanto. D'altra parte le vibrazioni non possono essere oblique poichè ciascuna potrebbe decomporsi in due, una longitudinale e l'altra trasversale e nella esperienza della interferenza di due raggi polarizzati ad angoli retti le vibrazioni longitudinali dovrebbero interferire.

§ 248. **Costituzione della luce naturale e della luce polarizzata.** — Nella *luce naturale o comune* (solare, ad arco ecc.) si ammette che le particelle dell'etere vibrino in tutte le direzioni possibili con una rapidità enorme. Anzi sembra accertato (e ciò giustificherebbe la impossibilità di fare interferire due raggi provenienti da due sorgenti luminose diverse) che oltre a cambiamenti di fase e di ampiezza subiscano incessantemente cambiamenti di direzione come se *CD* ruotasse intorno ad *AB*.

A – – – $\frac{C}{D}$ – – – *B*

Fig. 287.

Tanto grande sarebbe la velocità di questo moto che sembrerebbe in ogni istante esistere una infinità di vibrazioni in tutti i sensi.

Nella luce polarizzata invece si avrebbero le vibrazioni solo secondo una direzione sempre cioè secondo un piano passante per il raggio AB. Come piano individuante nel senso le vibrazioni si potrebbe assumere il piano $ABCD$, ma per ragioni speciali, si è pensato bene di assumere il *piano normale* cioè quello che riceve *normalmente* le vibrazioni. Questo piano, caratteristico del raggio è quello a cui abbiam data la denominazione di *piano di polarizzazione*.

§ 249. **Polarizzazione ellittica e circolare.** — Abbiamo notato che le particelle vibranti si muovono nel caso della polarizzazione detta rettilinea di moto oscillatorio lungo un segmento rettilineo

Vi son dei casi nei quali le vibrazioni luminose debbono concepirsi come prodotte da un moto delle particelle vibranti secondo curve che sono ellissi. Sono quei casi nei quali la luce che le costituisce si dice polarizzata ellitticamente o dotata di *polarizzazione ellittica*. A volte il moto vibratorio si deve concepire come procedente lungo un cerchio e la luce si dice allora polarizzata circolarmente o dotato di *polarizzazione circolare*.

Si potrebbe facilmente vedere che tanto la polarizzazione circolare come la polarizzazione rettilinea si possono considerare quali casi particolari della polarizzazione ellittica.

250. **Polarizzazione rotatoria - Polarimetro.** — Si mandi un fascetto parallelo di luce monocromatica, per esempio di luce verde, su di un polarizzatore e lo si riceva su di un analizzatore per modo che la sezione di questo sia ad angolo retto con quella del polarizzatore e quindi non passi luce oltre l'analizzatore. Interponendo una laminetta di quarzo tagliata perpendicolarmente all'asse cristallografico, la luce viene a passare attraverso all'analizzatore. Girando però l'analizzatore, si arriva di nuovo ad estinguerla. La luce che emerge dalla laminetta di quarzo è dunque ancora polarizzata rettilineamente, ma il suo piano di polarizzazione ha ruotato. Con alcuni cristalli di quarzo, per ristabilire l'oscurità bisogna girare l'analizzatore in un senso, per altri in senso contrario.

Fig. 288. - Interponendo fra due nicol incrociati N_1 N_2 cosicchè N_2 non lasci passare la luce monocromatica polarizzata da N_1 una lastra di quarzo tagliata perpendicolarmente all'asse la luce passa attraverso ad N_2. Si può ottenere l'oscurità facendo convenientemente ruotare N_2.

Per definire il senso della rotazione si considera un osservatore sdraiato lungo il raggio luminoso coi piedi rivolti dalla parte della sorgente. Se vede il piano di polarizzazione ruotare dalla sua sinistra verso la sua destra, il corpo che produce questa rotazione è detto *destrogiro*.

Se l'osservatore vede la rotazione del piano di polarizzazione effettuarsi dalla sua destra verso la sua sinistra il corpo attivo è detto *sinistrogiro levogiro*.

Si rappresenta con una freccia curva che accenna ad una rotazione nel senso delle lancette di un orologio la rotazione *destrogira*. E con una freccia che accenna ad una rotazione in senso contrario la rotazione *sinistrogira*.

Un sistema costituito da due nicol collocati sullo stesso asse, ad una certa distanza che renda possibile l'interposizione di un corpo, costituisce un *polarimetro* se uno dei nicol tale è da potersi far ruotare intorno al suindicato asse per modo da potere misurare con esattezza la rotazione.

Consente difatti il sistema indicato la misura della rotazione che dal piano di polarizzazione di una qualsiasi luce semplice determina il corpo in esame collocato fra i due nicol.

§ 251. **Luce parallela omogenea - Leggi di Biot.** — Ciò che abbiamo detto nel precedente paragrafo riguarda un qualsiasi raggio attraversante il cristallo e che sia *parallelo all'asse*. Inoltre va notato che i fenomeni indicati sono i medesimi per una posizione qualsiasi della lamina ottenuta mediante uno spostamento della lamina parallelamente a sè stessa o mediante una rotazione intorno all'asse. Biot dallo studio della polarizzazione rotatoria trasse le leggi seguenti:

1. L'angolo di rotazione impresso da una lamina di quarzo al piano di polarizzazione di un raggio di luce che l'attraversi, è proporzionale allo spessore della lamina.

2. Esistono varietà di quarzo che ad uguale spessore fanno ruotare il piano di polarizzazione di angoli uguali, ma di senso contrario.

La rotazione prodotta da lamine di senso contrario sovrapposte è la somma algebrica delle loro rotazioni proprie.

3. Per luci monocromatiche varie la rotazione cresce col diminuire della lunghezza d'onda Biot credette di riconoscere che la rotazione variava in ragione inversa del quadrato della lunghezza d'onda, ma da ricerche più recenti risulterebbe che tale legge è solo approssimativa.

Ecco, secondo Broch, le rotazioni corrispondenti ad alcune righe di Fraunhofer prodotte da una lamina di quarzo di 1 mm. di spessore:

B	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*
15°,30′	17°,24′	21°,67′	27°,46′	32°,50′	42°,20′.

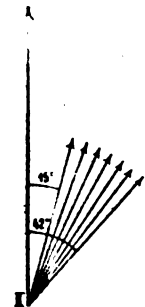



Fig. 289. - La varia rotazione per i principali raggi colorati costituenti la luce bianca dovuta ad una lastra di quarzo di 1 mm. Da 15° per la luce rossa a 42° per la violetta.

Ne segue se il raggio polarizzato incidente è bianco, il piano primitivo di polarizzazione di ogni luce semplice verrà fatto ruotare di angoli varii per le varie luci da un corpo dotato di polarizzazione rotatoria che dal raggio polarizzato venga fatto attraversare, e quindi con un nuovo nicol non si potrà estinguere che una sola luce semplice rimanendo visibile quindi la luce composta complementare.

La rotazione prodotta da una lastra dello spessore unitario (spesso si considera lo spessore di 1 mm.) misura il *potere rotarorio* della sostanza.

§ 252. **I saccarimetri.** — Oltre al quarzo tagliato perpendicolarmente all'asse, presentano il fenomeno della polarizzazione rotatoria i liquidi zuccherini e certe essenze. Per le soluzioni, come le zuccherine, di una sostanza *attiva* (capace di operare la rotazione) in una *inattiva*, si ha che la rotazione è proporzionale, oltre che allo spessore della soluzione attraversata, alla concentrazione. Questa proprietà è largamente applicata in *saccarimetria* mediante l'uso di polarimetri speciali detti *saccarimetri*.

PARTE TERZA

DELL'ELETTRICITÀ E DEL MAGNETISMO

CAPITOLO XXIV.

GENERALITÀ.

§ 253. **Elettricità - Corpi buoni e corpi cattivi conduttori della elettricità.** — Come i corpi possono riscaldarsi o divenire luminosi, possono, qualora vengano strofinati, assumere uno stato speciale per cui si dice che sono elettrizzati o che sono carichi di elettricità. L'elettricità è un *qualche cosa*, che, come la luce e come il calore, è atto a produrre determinati effetti. Il più comune è quello di attrarre corpi leggeri, quali pezzetti di carta, di midolla di sambuco, pagliuzze, foglioline d'oro ecc.

Fig. 290.

Quando un corpo, per esempio, un pezzo di ambra strofinato (Fig. 290), opera siffatta attrazione si dice carico di elettricità, sebbene possa esser carico e non operare l'attrazione perchè l'elettricità sia poca e incapace di esercitare la occorrente azione attrattiva. Corpi leggeri quali i nominati, possono costituire altrettanti *elettroscopi*, perchè possono farci scoprire la presenza di elettricità in qualche altro corpo. Ma sono elettroscopi *poco sensibili* in quanto sentono solo l'azione di quantità non troppo piccole di elettricità.

Uno dei corpicciuoli leggeri può servire da solo, meglio se, invece che appoggiato sul piano di un tavolo od altrimenti, sia sostenuto mediante un filo sottile di seta ad un sostegno, quale può essere un bastone, di vetro ad esempio, opportunamente piegato. Se il corpo leggero così sospeso è una sferetta di midolla di sambuco, si ha un sistema che ricorda il pendolo, che si chiama perciò *pendolino elettrico* e che costituisce il più semplice e comune elettroscopio (Fig. 291). Con esso può facilmente vedersi il fatto *generale* che *il corpo attratto, dopo essere rimasto per qualche tempo in contatto coll'attraente, viene da questo respinto.* Altri elettroscopi, veri strumenti scientifici, sono stati immaginati per scoprire tracce estremamente piccole di elettricità, cosicchè adesso si è in grado di poter mettere in rilievo la presenza delle minime quantità di elettricità contenute nei corpi.

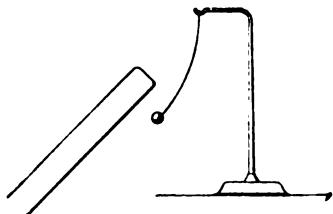



Fig. 291.

La produzione di elettricità in un corpo neutro, cioè non elettrizzato, si ha subito che si strofini il corpo con un altro; per quanto dalla

osservazione facile a tutti che strofinando un pezzo di ambra o un pezzo di ceralacca, con lana ad esempio, si possono attrarre facilmente dei piccoli pezzetti di carta, mentre strofinando un bastone di ferro o di ottone non solo non si riesce ad ottenere l'azione attrattiva, ma neppure ad agire sui più sensibili elettroscopi o rivelatori di cariche elettriche, sembri risultare che non tutti i corpi si elettrizzino per strofinamento.

Si risolve il dubbio appena si sappia che certi corpi, detti *buoni conduttori*, vengono con grande facilità attraversati dall'elettricità, mentre altri detti *cattivi conduttori*, non sono attraversati. I metalli, il corpo degli animali, le pietre, il terreno sono buoni conduttori. Il vetro, l'ambra, la ceralacca, le resine in genere sono cattivi conduttori.

Fu difatti la scoperta della conducibilità elettrica, fatta al principio del XVIII secolo da S. Gray, che mise sulla via di questa verità: che *tutti i corpi senza eccezione sono suscettibili d'essere elettrizzati.*

Descriviamo rapidamente i fatti che hanno condotto Gray a questa scoperta importante.

Avendo elettrizzato alla maniera ordinaria un tubo di vetro del quale i due estremi erano chiusi da turaccioli di sughero, egli osservò con sorpresa che il sughero, che non era stato strofinato, attirava, poi respingeva i corpi leggeri come faceva il tubo stesso. Così la proprietà elettrica s'era comunicata dal vetro al sughero.

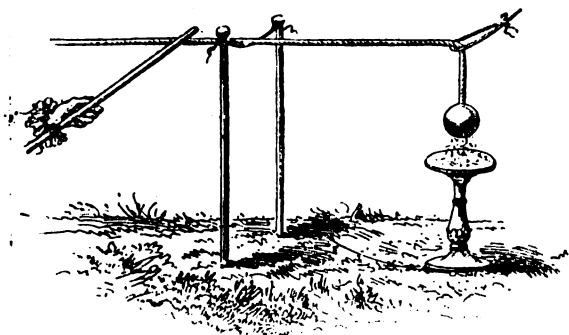



Fig. 292.

Gray seguitò questa esperienza, allungò i turaccioli con aste d'avorio, di legno, di metallo, e constatò i fenomeni anche all'estremità di queste aste, che terminavano con una palla d'avorio. Sospesa al di fuori d'un balcone, per mezzo di una lunga funicella attorcigliata attorno al tubo, la palla si mostrò ugualmente elettrizzata.

Egli variò queste esperienze in diverse maniere e potè constatare che la proprietà elettrica si comunica a distanze di più in più grandi: è così che la trovò sensibilmente la medesima all'estremità d'una corda lunga 230 metri. Ma per riescire, Gray osservò che certe condizioni erano necessarie: la corda che trasmetteva l'elettricità doveva essere sospesa da cordoni di seta: essa non dava più alcun segno di elettrizzazione dal momento che alla seta egli sostituiva un filo metallico.

Un'ultima esperienza di Gray, che si ripetè subito in tutti i gabinetti fisici, provando che il corpo umano conduce l'elettricità, fornì la spiegazione dell'impossibilità nella quale si era stati fino allora di elettrizzare tutta una serie di corpi quali i metalli.

Avendo difatti sospeso un fanciullo coll'aiuto di corde di crine, come mostra la Fig. 293, poi avendogli fatto toccare il suo tubo di vetro elettrizzato, constatò che tutte le parti del corpo del fanciullo, il viso, le mani e perfino i vestiti avevano acquistato la proprietà d'atti-

rare, poi di respingere i corpi leggeri che gli si avvicinavano. I medesimi fatti si producevano quando, invece di sospendere il corpo del fanciullo, lo si collocava sopra ad uno sgabello formato d'una sostanza idio-elettrica (secondo l'espressione dell'epoca) quale ad esempio una schiacciata di resina (Fig. 294).

Fig. 293.

Dopo ciò che si è detto a proposito delle due categorie di corpi buoni e cattivi conduttori si capisce che se si strofina un bastone di ceralacca tenendolo direttamente per mano, la elettricità suscitata nel luogo strofinato vi rimane perchè la massa stessa della ceralacca non si lascia da essa attraversare per raggiungere la nostra mano, e, attraverso al nostro corpo e all'edificio nel quale ci troviamo, non può diffondersi nell'intero globo terrestre. Il bastone di ceralacca deve per tutto ciò dar segno della propria elettrizzazione. Se invece di un bastone di ceralacca si tratta di un bastone metallico, non appena si è sviluppata elettricità per strofinio, questa, sfugge attraverso al metallo buon conduttore e attraverso al corpo dello sperimentatore sino al suolo.

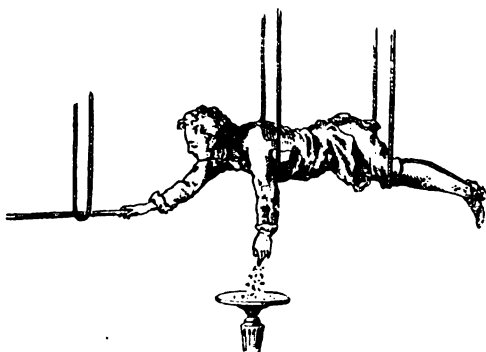



Fig. 294.

Fig. 295.

È chiaro che con un artificio molto semplice si può verificare la produzione di elettricità per strofinio anche nei metalli ed in genere nei corpi buoni conduttori. Basterà difatti, quando si strofinano, sostenerli (Fig. 295) mediante un corpo cattivo conduttore; la qual cosa equivale ad isolarli, come si dice, dagli altri corpi conduttori vicini. Questa è la ragione per la quale i corpi cattivi conduttori si dicono anche *isolanti*. Si danno loro anche le denominazioni di *coibenti* e di *dielettrici*.

§ 254. **Elettricità positiva e negativa - Principio della conservazione della elettricità - Piezoelettricità - Piroelettricità.** — Supponiamo di accostare alla pallina di un pendolo elettrico un bastone di ceralacca previamente strofinato e che alla pallina respinta dalla ceralacca si accosti un bastone di vetro strofinato con una pelle

di gatto. L'esperienza mostra che quella pallina è attratta dal vetro. Questo fatto ci indica evidentemente che l'elettricità acquistata dalla ceralacca per strofinìo non è identica a quella acquistata dal vetro strofinato con una pelle di gatto, poichè se fosse stata identica la pallina dopo il contatto colla ceralacca, dalla quale avrà preso elettricità per contatto, avrebbe dovuto comportarsi ugualmente colla ceralacca e col vetro.

Ne risulta: *Le condizioni elettriche o, per dirla in modo più semplice, la elettricità suscitata nel vetro è diversa da quella suscitata nella resina. Corpi carichi della stessa elettricità si respingono e corpi carichi di elettricità diversa si attraggono* (Fig. 296).

Orbene, sino ad ora non è stato possibile ottenere nei corpi condizioni di elettrizzazione diverse da quelle due ora considerate nel vetro e nella resina; in questo senso cioè, che nei diversi corpi non è stato possibile suscitare se non elettricità, che rispetto a quella considerata nella resina, si comporta come quella considerata nel vetro, o elettricità che rispetto a questa ultima si comporta come quella considerata nella resina.

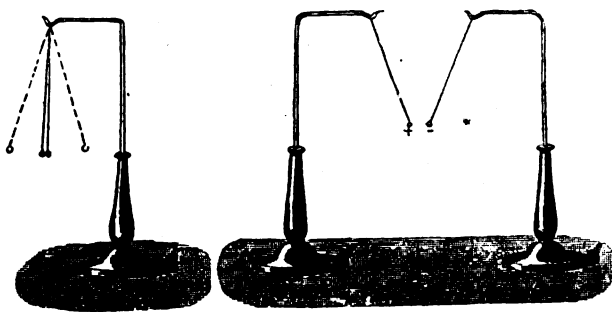



Fig. 296. - Due sferette di sambuco ugualmente elettrizzate si respingono e due elettrizzate oppostamente si attraggono.

Chiamiamo *vitrea* o *positiva* l'elettrizzazione suscitata nel vetro agendo nel modo indicato, e *resinosa* o *negativa* quella suscitata nella resina, e per semplicità parleremo poi sempre, come si usa, di elettricità positiva e negativa.

Comunicando ad un corpo elettricamente neutro quantità uguali di elettricità positiva e negativa, il corpo si mantiene neutro, perchè si dimostra in generale che *una quantità determinata di elettrictà positiva o negativa ne distrugge una quantità uguale di negativa o positiva rispettivamente.*

Si dimostra (§ 257 e Fig. 303 *bis*) che *quando si elettrizza per strofinamento un corpo, si manifesta nel corpo strofinante una carica uguale ma di nome contrario a quella del corpo strofinato.*

In generale avviene che quando sorge una quantità di elettricità di un certo nome (positiva o negativa), sorge sempre in altro luogo più o meno vicino al primo una quantità uguale di elettricità di nome contrario (negativa o positiva rispettivamente). E siccome cariche uguali e di nome contrario complessivamente considerate costituiscono la condizione di neutralità elettrica, si può in certo senso dire che nessuna azione ci permette di creare o distruggere elettricità. Questa asserzione costituisce il cosidetto *principio della conservazione della elettricità.* Oltre all'esempio citato riguardante la produzione di elettricità per strofinìo, possiamo al riguardo citare gli altri (v. anche § 257) due casi seguenti:

Piezoelettricità. — La compressione o la trazione di certi cristalli emiedri come il quarzo dà origine a cariche uguali e di segno contrario

agli estremi della perpendicolare alla linea (opportunamente scelta) di trazione o di compressione. Il fenomeno è reversibile, nel senso che la elettrizzazione allunga od accorcia il cristallo.

Piroelettricità. — Certi cristalli emiedri come la tormalina si elettrizzano quando si scaldano. I due estremi del cristallo prendono cariche uguali ma di segno contrario.

§ 255. **Natura della elettricità - Elettrone e sua massa.** — È stato detto (H. Poincaré) molto giustamente: « una teoria scientifica che pretenda insegnare ciò che è il calore e l'elettricità o la vita, è condannata sin dal suo sorgere; tutto ciò che essa può darci non è che un'immagine grossolana della realtà ».

Le condizioni attuali della Scienza confermano questo modo di vedere: se si parla di *natura* della elettricità, si intende di indicare *un modo di vedere* che si trovi in accordo con tutti i fatti osservati; e non certo di additare con sicurezza la *essenza ultima.*

Nel volgere del tempo si ebbero varie ipotesi sulla natura della elettricità. Si pensò dapprima (Franklin) che la elettricità fosse una materia speciale, un fluido come si diceva, continuo ed imponderabile che poteva infiltrarsi fra le molecole dei corpi. Ogni corpo elettricamente neutro ne avrebbe contenuto una quantità *normale.* Se un corpo avesse contenuto fluido elettrico in eccesso sulla quantità normale, avrebbe dato segni di elettrizzazione positiva; se ne avesse contenuto meno della quantità normale avrebbe dato segno di elettrizzazione negativa. In altre parole la elettrizzazione positiva sarebbe stata determinata da fluido elettrico *in eccesso* od *in più*; la elettrizzazione negativa invece da fluido elettrico *in difetto* od *in meno.* Da questo modo di vedere anzi sorsero le denominazioni di positiva e negativa per le elettricità vitrea e resinosa.

Un altro modo di vedere (Symmer), salva la natura fluidica della elettricità, fu che esistessero due specie di fluidi; uno vitreo o positivo e l'altro resinoso o negativo.

A queste ipotesi *dei fluidi* succede (Faraday e Maxwell) in ordine di tempo un modo nuovo di considerare i fenomeni elettrici. Questi non si sarebbero più dovuti attribuire ad un *qualche cosa* di contenuto nei corpi conduttori, ma a condizioni particolari di tensione elastica nel mezzo isolante ad essi circostante.

Questa ipotesi, dovuta principalmente alla necessità di spiegare le azioni elettriche a distanza, ebbe la sua origine da nuove osservazioni e fu altamente feconda di nuove ricerche, di nuovi risultati, di nuove applicazioni. Era però incompleto e quindi si ebbe successivamente un nuovo modo di vedere secondo il quale la elettricità sarebbe costituita da piccole particelle dette *elettroni,* capaci di venir contenute nei corpi, mentre le azioni a distanza della elettricità si dovrebbero all'intervento del mezzo isolante interposto fra i corpi medesimi. Due ipotesi sono state emesse al riguardo. Secondo una esisterebbero due specie di elettroni, i positivi ed i negativi. La carica positiva o negativa di un corpo dipenderebbe dalla prevalenza in esso del numero di elettroni positivi sul numero di elettroni negativi esistenti o viceversa. Un corpo sarebbe elettricamente neutro se contenesse ugual numero di elettroni dei due segni. Secondo l'altra ipotesi esisterebbe una sola specie di elettroni.

Un corpo neutro ne conterrebbe una certa quantità *normale*; un corpo carico negativamente ne conterrebbe in eccesso sulla quantità normale; ed un corpo carico positivamente ne conterrebbe in difetto sulla quantità normale.

Le due ipotesi vigono attualmente entrambe; ma siccome dalla esperienza si sono per ora resi tangibili solo elettroni negativi, la generalità dei fisici propende per la seconda. In questo libro seguiremo questa seconda ipotesi.

La massa degli elettroni si ritiene poco più grande della duemillesima parte di quella dell'atomo di idrogeno. Fisicamente quindi l'atomo non è indivisibile. Nello stato presente della Scienza l'elemento ultimo di divisione sarebbe l'elettrone.

§ 256. **Elettroscopi e polveri elettroscopiche.** — Già dicemmo che il pendolino è il più semplice elettroscopio.

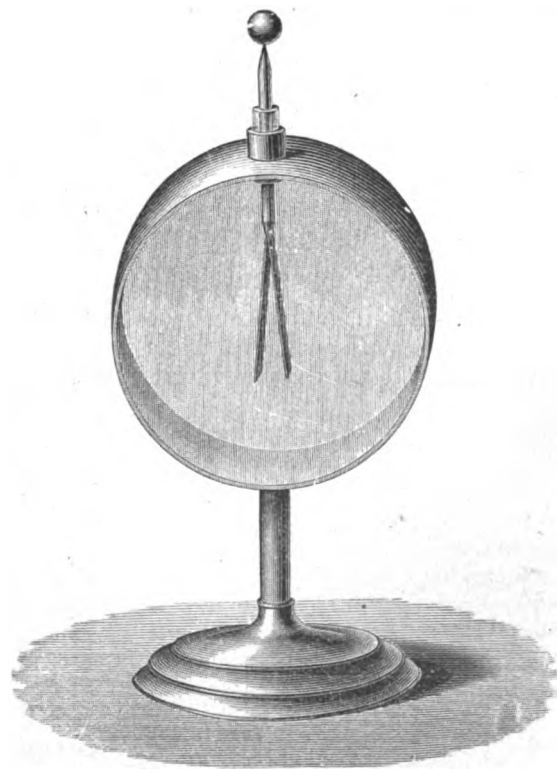
Avvicinando ad esso un corpo, questo è o no elettrizzato: secondo che attrae o no, la sferetta del pendolino. E per fissare lo stato elettrico del corpo si lascia che il pendolino vada a toccar il corpo, ne prenda una parte della carica e venga quindi respinto.

Accostando allora un pezzo di ceralacca elettrizzato al pendolino, il corpo sarà elettrizzato negativamente o positivamente secondo che viene respinto od attratto.

Altri elettroscopi più sensibili del pendolino elettrico sono quelli a foglie d'oro o d'alluminio.

Fig. 297.

L'elettroscopio a due foglie consiste sostanzialmente (Fig. 297) in una asta metallica terminata a un estremo con una sfera e ad un altro con due piccole foglie di alluminio battuto, vicine l'una all'altra e libere all'estremo inferiore. Questo sistema è disposto attraverso il tappo isolante (paraffina o dielettrina, miscuglio questo di zolfo e di paraffina), di una bottiglia o di un recipiente metallico con finestre in vetro, per modo che nell'interno si trovi l'estremità che sostiene le foglie. Toccando la sfera con un corpo di cui si voglia sapere se è carico o no, parte dell'elettricità del corpo, se que-

sto ne contiene, anderà alle foglie, che per ripulsione reciproca divergeranno.

Con questo elettroscopio può indirettamente conoscersi il segno della carica, ma la cosa è più semplice e spedita se si usa l'altro elettroscopio che più sotto descriviamo.

L'elettroscopio ad una foglia d'oro (Fig. 298), differisce da quello descritto solo per possedere invece di due una sola foglia, e per avere

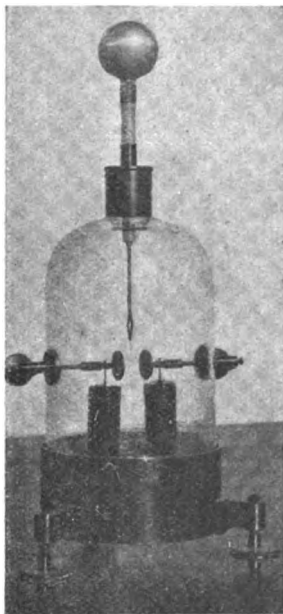



Fig. 298.

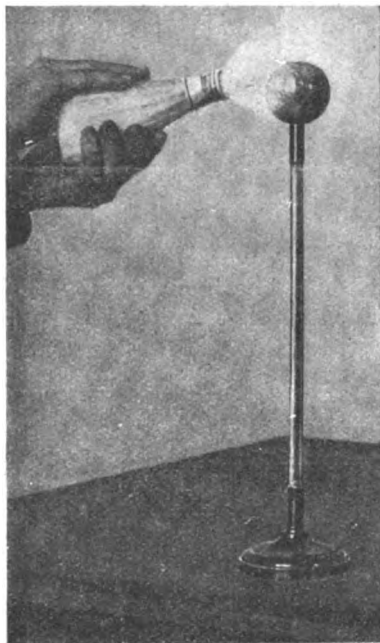



Fig. 299.

disposti simmetricamente rispetto alle due facce di questa due conduttori carichi permanentemente di elettricità di segno opposto, positivamente l'uno e negativamente l'altro.

Basta che, toccando la sfera dell'elettroscopio con un corpo da studiare in ordine alla carica elettrica che possa possedere, la foglia metallica pieghi verso l'uno o verso l'altro dei conduttori, per dire che il corpo non solo è carico, ma di elettricità negativa o positiva rispettivamente.

Polveri elettroscopiche. — Prendiamo un corpo carico di elettricità negativa quale ad esempio la sfera metallica, sostenuta da un piede isolante, rappresentata dalla Fig. 299.

Con un soffietto dentro cui sia una mescolanza omogenea di polvere di zolfo (gialla) e di polvere di minio (rossa), proiettiamo, come mostra la stessa Fig. 299, e attraverso alla rete di crine che chiude superiormente il soffietto, della polvere sul corpo carico.

Il corpo carico accoglie solo il minio e rigetta lo zolfo; si riveste di uno strato giallo di minio.

Proiettiamo lo stesso miscuglio sulla stessa sfera metallica isolata caricata di elettricità positiva. La sfera accoglie lo zolfo, ricoprendosi di uno strato giallo e rigetta il minio.

La ragione dei due comportamenti indicati, e che sola li spiega, è questa, che le due polveri mescolate uscendo dal soffietto con violenza si elettrizzano per strofinìo reciproco e per strofinìo colle maglie della rete: l'uno, lo zolfo, di elettricità negativa; l'altro, il minio, di elettricità positiva.

Lo zolfo sarà quindi solo accolto dal corpo carico positivamente ed il minio soltanto da quello carico negativamente.

Ecco un modo spiccio per accorgersi se un corpo è carico di elettricità positiva o negativa; comodo ed opportuno però solamente in certi casi. Miscugli quale l'indicato di zolfo e minio ricevono il nome di polveri elettroscopiche.

257. **Influenza elettrica - Carica stabile per influenza.** — Prendiamo un corpo conduttore isolato, una sfera metallica ad esempio.

Carichiamo la sfera di elettricità positiva, e portiamole vicino, ma non a contatto, il cilindro e poi proiettiamo sulla sfera e sul cilindro della polvere elettroscopica. La sfera si riveste di zolfo. Il cilindro si riveste di rosso nella estremità vicina alla sfera, di giallo nella estremità lontana e si impolvera col miscuglio elettroscopico nella regione mediana, indizio che ha assunto carica negativa nella regione vicina alla sfera, positiva nella lontana ed è rimasto neutro nella regione mediana.

Ripuliamo tutto, carichiamo la sfera di elettricità negativa e proiettiamo di nuovo su sfera e cilindro della polvere elettroscopica. La sfera si riveste di minio ed il cilindro si riveste di zolfo sulla estremità vicina alla sfera, di minio sulla estremità lontana e si impolvera col miscuglio in mezzo.

Concluderemo allora che *quando un conduttore isolato si avvicina ad un corpo elettrizzato si manifestano nel conduttore segni elettrici opposti. Nella parte di esso prossima al corpo carico si ha segno elettrico opposto, e nella regione più lontana si ha segno elettrico dello stesso nome di quello del corpo* (Fig. 300 e 301 - Vedi anche Fig. 302 a 303 bis).

Il fenomeno riceve il nome di fenomeno di *influenza*. Influenzante si chiama il corpo carico, influenzato il corpo sul quale per la vicinanza del primo si manifestano, come abbiamo detto, le cariche opposte. Regione neutra si chiama quella mediana, nella quale non si ha segno alcuno di elettrizzazione.

Carichiamo la sfera di elettricità positiva, portiamogli vicino il cilindro per modo che sorgano in questo le cariche di influenza, poi allontaniamo l'un corpo dall'altro. Proiettiamo quindi polvere elettroscopica su sfera e su cilindro così lontani l'uno dall'altro. La sfera si riveste di zolfo, ma il cilindro accoglie il miscuglio delle polveri dimostrando la perdita delle cariche di influenza.

Analogo risultato si ottiene se si carica di elettricità negativa la sfera.

Influenza elettrica.

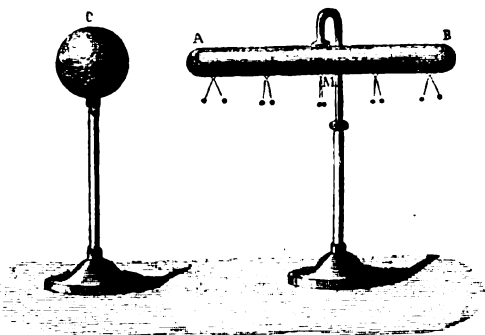



Fig. 300. - Altro modo di dimostrare le cariche suscitate per influenza in A ed in B dal corpo elettrizzato C. Servono sferette di midollo di sambuco sostenute da coppie di fili conduttori a vari punti del corpo influenzato AB. La figura indica di per sè al lettore come proceda la esperienza. Con un conduttore di carica nota rispetto a quella del corpo influenzante si può facilmente porre in rilievo che in A ed in B sono cariche di influenza fra loro opposte, e tali di più che quella di A è opposta a quella di C.

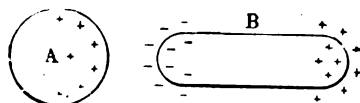



Fig. 301.

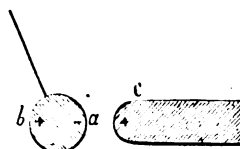



Fig. 302. - Questa figura mostra che in fondo il fatto primordiale dell'attrazione di un corpo leggero quale è la sferetta ba di un pendolino per parte del corpo carico C, è una conseguenza del fenomeno di influenza.

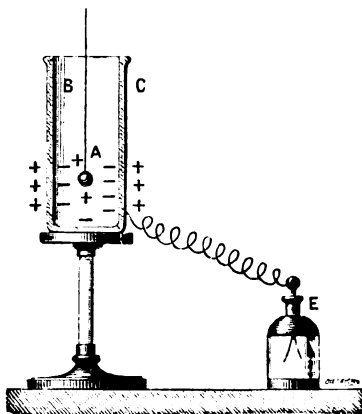



Fig 303. - Come si dimostra che le cariche di influenza sono uguali fra loro e uguale ciascuna a quella del corpo influenzante. Dopo aver notato la deviazione della foglia dell'elettroscopio per la collocazione della sfera A carica nel cilindro, se ne nota il ritorno a posto ritraendola. Ricollocandola si nota che l'angolo di deviazione delle foglie quando la sfera è sospesa rimane quello stesso lasciando cadere A nel cilindro. L'esperienza riesce meglio e più esattamente se il filo che sostiene la sfera passa attraverso al foro di un disco metallico munito di manico isolante e capace di fare da coperchio al recipiente cilindrico durante le operazioni. Il cilindro col relativo coperchio riceve il nome di *cilindro del Faraday*.

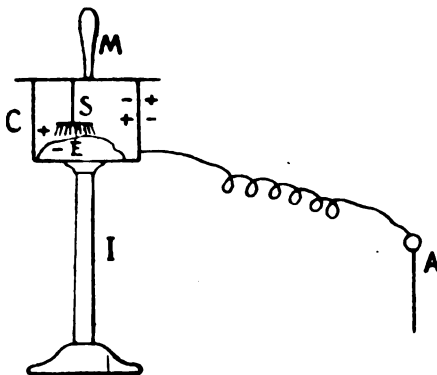



Fig. 303 bis. - Come col cilindro del Faraday si può dimostrare che strofinando assieme due corpi, si elettrizzano entrambi con cariche uguali ed opposte. Il coperchio porta nella parete inferiore uno spazzolino S di pelle di gatto e il cilindro contiene fino ad una conveniente altezza del materiale isolante E come ebanite. Adattando il coperchio, muovendolo in modo da strofinare collo spazzolino l'ebanite, si nota che per quanto si strofini, l'elettroscopio in comunicazione col cilindro non si carica, e ciò perchè le due cariche opposte ed uguali suscitate in S e in E determinano effetti di influenza uguali ed opposti che si neutralizzano, basta asportare il coperchio collo spazzolino perchè le foglie dell'elettroscopio deviano in causa dell'influenza della carica di E. Levando rapidamente E e rimettendo a posto S si ha la deviazione in causa dell'influenza della carica di S.

Questi fatti sono una conseguenza di una circostanza (in armonia col principio del § 254), che cioè le due cariche di influenza sono uguali in quantità fra loro e — se il corpo influenzato coinvolge l'influenzante — uguali ciascuna a quella del corpo influenzante (Fig. 303).

Del resto, sul fatto della influenza si può basare un processo di carica stabile d'un corpo. Se prima di allontanare il cilindro dalla sfera, il corpo influenzato cioè dall'influenzante, si ha cura di mettere il corpo influenzato in comunicazione col suolo toccandolo per esempio con un dito; sopprimendo poi subito questa comunicazione, rimane sul corpo influenzato stesso carica permanente di nome contrario a quella del corpo influenzante.

§ 258. **L'elettricità va alla superficie esterna dei conduttori.** — Servono bene per dimostrarlo gli emisferi di Coulomb (Fig. 304). Si elettrizza una sfera metallica isolata e se ne ricoprono le due metà con due emisferi metallici cavi a piedi isolanti; la elettricità della sfera abbandona questa per portarsi alla superficie esterna del sistema, che è la superficie convessa degli emisferi. La stessa cosa si dimostra col cono o reticella di Faraday, consistente in un anello metallico isolato, cui è fissato l'orlo di un sacchetto conico di mussolina, al cui vertice sono attaccati dalle due parti due fili di seta

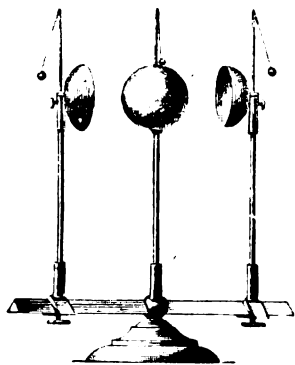



Fig. 304.

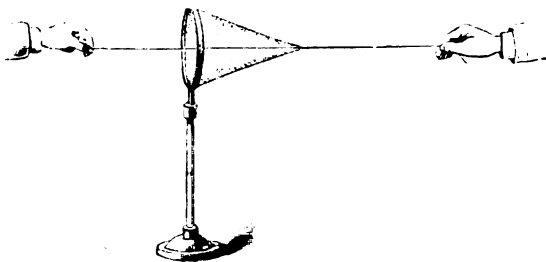



Fig. 305.

che permettono di rivoltarlo nei due sensi come una calza. Messa la reticella in una posizione, si elettrizza l'anello, e con una sferetta metallica sostenibile con manico isolante (piano di prova), che si porti una volta a contatto dalla superficie esterna e successivamente colla sferetta di un elettroscopio, una volta a contatto della superficie interna e successivamente colla sferetta di un elettroscopio; si constata che la superficie esterna della reticella è elettrizzata e l'interna no. Se la si rivolta così da invertire le facce, si scorge che la elettrizzazione appartiene alla faccia divenuta esterna e che prima era interna (Fig. 305).

Per tutti i corpi conduttori cavi o massicci, si può dimostrare con esperienze opportune che l'elettricità ad essi comunicata si porta tutta alla superficie esterna.

Se si dispone di una sfera metallica cava, isolata e munita di una piccola apertura attraverso la quale possa passare senza toccarne gli orli una sferetta metallica sostenibile con un manico isolante (piano di prova), si può, col sussidio anche di un elettroscopio, stabilire il fatto facilmente.

Basta infatti toccare colla sferetta la superficie interna della sfera cava, e poi successivamente l'elettroscopio, per notare l'impassibilità delle foglie di questo; mentre tali foglie divergono subito non appena l'elettroscopio venga toccato dalla sferetta che abbia prima avuto con-

tatto colla superficie esterna della sfera cava. Le figure 306 e 307 mostrano bene come si debbono operare i contatti.

Una esperienza persuasiva, che del resto si può imitare con una gabbia metallica e con un elettroscopio, la fece Faraday chiudendosi con appositi apparecchi in una camera metallica (casotto o gabbia di

Fig. 306.

Fig. 307.

Faraday). Anche quando questa si elettrizzava tanto da poterne ricavare scintille dall'esterno, non solo egli non risentiva alcun effetto, ma neppure gli strumenti accennavano ad alcun elettrizzamento.

§ 259. **Densità elettrica superficiale.** — Si può dimostrare che *nelle regioni interne dei conduttori, l'elettricità, così distribuita sulla superficie esterna, non fa sentire alcuna azione.*

Di più risulta da esperienze accurate che la elettricità si distribuisce sulla superficie esterna in quantità uguali, per le varie, piccole, ma uguali regioni superficiali, soltanto nel caso della sfera (Fig. 308 *a*). Negli altri casi, nei quali la superficie dei conduttori sia differentemente incurvata nei diversi punti, l'elettricità si addensa maggiormente là dove l'incurvatura è maggiore.

Se il conduttore ha la forma ovoidale (Fig. 308 *b*), l'elettricità si

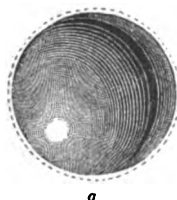
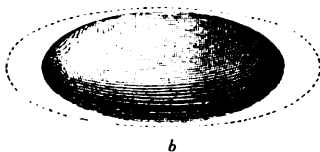
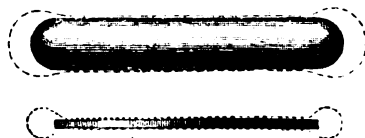



Fig. 308. Fig. 309.

distribuisce in quantità decrescente dalle regioni estreme a sinistra e a destra alla regione mediana.

Se la elettricità è distribuita uniformemente alla superficie di un corpo, si chiamerà *densità superficiale* δ il rapporto della quantità di

elettricità q che copre una *superficie* S a questa superficie: $\delta = \frac{q}{S}$.

Se la ripartizione è qualunque si chiamerà *densità superficiale in un punto* A, il limite del suindicato rapporto per un elemento superficiale circostante A, allorchè l'estensione di tale elemento tenda a zero.

Talvolta si ritiene approssimativamente misurata dalla quantità di elettricità contenuta nell'unità di superficie intorno al punto considerato.

A parità di tutte le altre circostanze, la densità elettrica è inversamente proporzionale al raggio di curvatura della superficie in corrispondenza del punto, essendo tal raggio quello della sfera tangente alla superficie in quel punto.

Le linee punteggiate delle figure 308 e 309 danno, colle distanze dei diversi loro punti dalle superfici dei corpi rappresentati, una idea dei valori relativi delle densità.

CAPITOLO XXV.

IL CAMPO ELETTRICO.

§ 260. **Campi di forza.** — Spesso interviene l'opportunità di considerare i valori di una certa forza ed in genere di un vettore (ad esempio della forza esercitata sull'unità di massa dalla azione di gravità) in tutti i punti di una certa regione dello spazio. Talvolta i valori e le direzioni possono essere diversi da punto a punto, e anche variabili con continuità.

In generale si chiama *campo vettoriale*, o, in particolare, *campo di forza* ogni regione dello spazio nella quale per ciascun punto si debba considerare un valore determinato per il vettore, o, in particolare, giacchè la forza è un vettore, si faccia sentire una determinata forza. Così intorno al nostro globo si ha il campo di forza della gravità che perciò si dice campo gravifico. Per esso l'*intensità*, cioè il valore della forza, è varia da punto a punto e la direzione è, per ogni punto, verticale; quindi diversa per due punti qualsivogliano che non appartengano alla stessa verticale. Nel caso particolare in cui intensità e direzione si mantengano costanti dappertutto, il campo si dice *uniforme*.

§ 261. **Linee di forza e di flusso.** — Consideriamo ora un punto P (Fig. 310) di un campo di forza e la retta che esce da P ed ha la direzione ed il senso del vettore applicato in esso. Su questa retta prendiamo un punto P' vicino a P e conduciamo la retta che esce da P' ed ha la direzione ed il senso della forza in P'. Analogamente su questa retta prendiamo un punto P'' vicino a P' e conduciamo la retta che parte da P'' ed ha la direzione ed il senso della forza applicata in esso; e così di seguito. Otterremo una linea poligonale i cui lati PP', $P'P''$, $P''P'''$, $P'''P^{IV}$ danno rispettivamente la direzione ed il senso della forza nei punti P, P', P'', P''', P^{IV}. Quanto più questi si prendono vicini, tanto più piccoli saranno i lati della poligo-

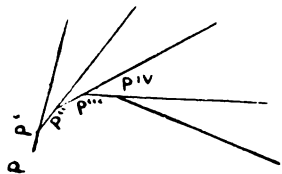
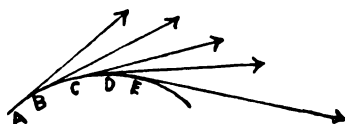



Fig. 310.

nale; e se immaginiamo di impiccolire sempre più le distanze fra un punto ed il consecutivo in modo che queste diventino estremamente piccole, avremo che la poligonale stessa tende a ridursi ad una linea continua che passa per P ed in ogni suo punto ha la direzione ed il senso della forza passante per il punto stesso. Tale linea dicesi *linea di forza* passante per P. Per i vettori in generale si parlerà di *linea di flusso*.

Si sa dalla geometria che la direzione di una curva varia da punto a punto ed è in ciascun punto individuata dalla tangente condotta per esso.

Fig. 311.

Si chiama in generale *linea di forza* una linea, di un campo di forza, tale che in ogni suo punto la tangente ha la direzione ed il senso del campo (Fig. 311).

Dalla precedente costruzione risulta che di tali linee ne esistono infinite e precisamente una ed una sola per ogni punto del campo.

§ 262. **Tubi di flusso o di forza - Flusso di forza.** — Consideriamo ora una linea chiusa tutta compresa in un campo di forza. Le linee di flusso o di forza passanti per i punti di essa formano la superficie laterale di uno spazio tubolare che si chiama *tubo di forza* o *di flusso*.

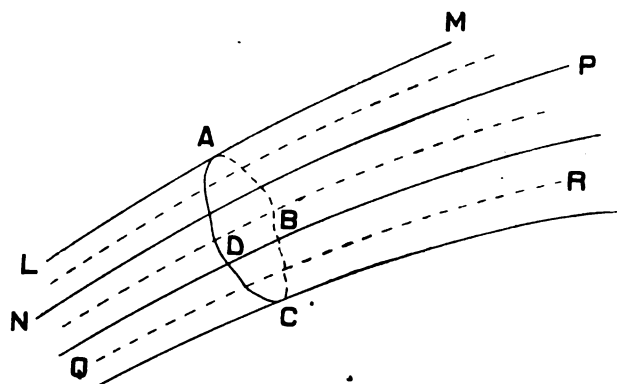



Fig. 312.

Si dicono *elementari* i tubi di flusso aventi sezione estremamente piccola.

È chiaro che in un campo uniforme le linee di flusso sono parallele ed i tubi di flusso sono quindi rettilinei e di sezione costante.

Nel campo dovuto alla gravità le linee di forza sono raggi concorrenti al centro della Terra, aventi cioè per direzione la verticale.

I tubi di flusso sono coni che hanno per vertice il centro della Terra.

Se ci si limita a considerare il campo per breve estensione superficiale, si può ritenere che la forza abbia lo stesso valore in tutti i punti del campo e la stessa direzione. Il campo è perciò uniforme; le linee di forza sono tutte verticali e parallele; i tubi di flusso sono cilindrici.

Se consideriamo una sezione retta in un tubo elementare, per la piccolezza di tale sezione si può riguardare uguale per tutti i punti di essa l'intensità del campo. Il *prodotto dell'area della sezione per l'intensità del campo* dà la misura di quella grandezza che chiamasi *flusso di forza* o semplicemente *flusso* attraverso alla sezione considerata. Se si considerasse una sezione obliqua anzichè retta di un tubo elementare,

per avere il valore del flusso bisognerebbe decomporre l'intensità del campo in due componenti perpendicolari fra loro una delle quali normale alla sezione; ed il *flusso* corrispondente a tale sezione obliqua verrebbe espresso dal *prodotto dell'area della sezione per la componente dell'intensità del campo perpendicolare alla medesima.*

In generale, il prodotto dell'area di una piccola porzione di superficie o come si dice di un elemento superficiale, per la componente dell'intensità del campo normale al medesimo, esprime il *flusso attraverso l'elemento superficiale* considerato. È ovvio che il flusso di forza attraverso alla superficie laterale di un tubo di flusso è uguale a zero.

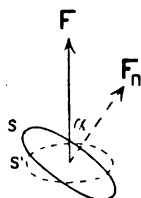



Fig. 313.

Per passare al caso di una superficie S qualunque, la si immagina suddivisa in elementi superficiali; si addizionano i prodotti dell'area di ciascun elemento per la componente dell'intensità del campo normale ad esso e così si ottiene il *flusso di forza attraverso la superficie* S. Se la suddivisione in parti della superficie S è fatta in modo che per ognuna delle parti il flusso abbia il valore 1, e se inoltre ad ogni parte si fa corrispondere un tubo di flusso (*tubo unità*), il numero dei tubi così ottenuti sarà uguale al numero che esprime il flusso attraverso la superficie S. Spesso si parla di *numero di linee di flusso* e numero di linee di forza tagliate da una superficie per esprimere il numero dei tubi di flusso unitari elementari e per dare quindi il valore del flusso attraverso la superficie stessa. Si attribuisce una linea di forza ad ogni tubo unitario.

Il sistema giova frequentemente per indicare anche il valore relativo della forza.

§ 263. **Legge del Coulomb - Unità elettrostàtica di quantità di elettricità - La carica dell'elettrone - Il Coulomb.** — Le prime e più semplici esperienze elettriche avevano mostrato, che la forza esercitantesi fra due copri elettrizzati diminuisce, collo aumentare la distanza che li separa. Il fisico francese Coulomb fece conoscere con qual legge la forza varia al variare della distanza. Tal legge del Coulomb è in certo modo quella stessa che il Newton aveva formulato per la gravitazione. La forza, cioè, agisce *secondo la retta che congiunge i due corpi (supposti di piccole dimensioni), e varia in ragione inversa del quadrato della loro distanza.* Cosicchè se la distanza fra i due corpi elettrizzati viene raddoppiata, triplicata ecc., la forza che fra essi si manifesta, diventa la quarta parte, la nona parte e così di seguito. Questa forza, come è noto, è poi attrattiva o ripulsiva, ossia, tende ad avvicinare fra loro i due corpi oppure ad allontanarli l'uno dall'altro, secondo che i loro stati elettrici sono opposti o dello stesso nome.

Fissa questa legge del Coulomb si può introdurre nella scienza il concetto di *quantità di elettricità,* convenendo di dire, che se un corpo A attira o respinge un determinato corpo elettrizzato B, una volta con una certa forza e un'altra volta con una forza doppia, restando nei due casi invariata la posizione reciproca dei corpi A e B, nel secondo caso il corpo A *possiede una quantità di elettricità* doppia di quella posseduta nel primo caso. Si conviene di rappresentare con numeri preceduti dal segno + le cariche positive e con numeri preceduti dal segno — le cariche negative.

La data definizione di *quantità di elettricità* porta a dire, che la forza esercitantesi fra due corpi elettrizzati è proporzionale alle *quantità di elettricità* oltre che in ragione inversa del quadrato della distanza.

Se con q e con q' indichiamo le quantità di elettricità messe in presenza e con r la mutua distanza, la legge del Coulomb dà per il valore della forza F esercitantesi fra i corpi carichi, la seguente espressione:

$$F = \pm k \frac{qq'}{r^2}. \qquad (71)$$

Il coefficiente k dipende dalle unità di misura scelte per le varie grandezze e dalla natura del mezzo interposto fra i corpi carichi. Prescindendo dall'influenza del mezzo, k può diventare 1 scegliendo opportune unità di misura. Il segno + varrà per il caso della forza di repulsione (se le cariche hanno lo stesso segno) ed il segno — per la forza di attrazione (se le cariche hanno segno contrario).

Si diranno uguali in valore assoluto due cariche di specie contrarie, allorchè comunicate ad uno stesso conduttore, lo lasciano allo stato neutro. Le cariche uguali in valore assoluto ma di segno diverso diconsi anche *equivalenti*, e sopra un dato corpo elettrizzato posto a determinata distanza esse producono forze uguali e di direzioni opposte.

Si usano spesso i vocaboli di *massa elettrica* o quelli di *carica elettrica*, in luogo di *quantità di elettricità*. In ogni caso nulla si pregiudica circa la natura della elettricità.

Si definiscono varie unità di misura per le quantità di elettricità usate a seconda dei casi e delle esigenze. Una unità di uso scientifico è la cosidetta *unità assoluta elettrostatica*. Essa è quella tale quantità di elettricità che agendo sopra ad una uguale quantità posta all'unità di distanza (1 cm.) esercita una forza di una *dine*. L'elettrone ha la carica di $4{,}2 . 10^{-10}$ unità elettrostatiche.

Unità *pratica* di quantità è il *coulomb* che equivale a $3{,}10^9$ unità assolute elettrostatiche.

§ 264. **L'equilibrio elettrico.** — Caricato un corpo di elettricità, quando anche esso sia isolato, si verifica per ragioni che impareremo presto, una perdita lenta e continua della elettricità da esso posseduta per modo che in un tempo più o meno lungo il corpo ritorna allo *stato neutro*. Tale fenomeno detto di *dispersione* può fortemente attenuarsi e nelle migliori condizioni per un tempo non troppo lungo può ritenersi praticamente trascurabile.

Per corpi in siffatte condizioni nulla varierà coll'andar del tempo, se essi saranno immobili. Oltre all'equilibrio meccanico si dovrà dunque considerare l'*equilibrio elettrico*, il quale porta a ciò che le forze, che si manifestano, restino invariate.

§ 265. **Campo elettrico.** — Si chiama *campo elettrico*, tutto lo spazio che circonda i corpi elettrizzati, ed in cui si manifestano le loro azioni elettriche. Esso mantiene, se tutto procede come abbiamo indicato, inalterate le sue condizioni. È cioè costante.

I fenomeni producentisi in questo stato invariabile, diconsi fenomeni *elettrostatici*. Per il loro studio è utile considerare la *forza elettrica in un punto qualunque del campo*. La si definisce come quella forza che

si manifesterebbe in quel punto, qualora vi si ponesse una unità di elettricità positiva, supposto che con ciò nessuna variazione accadesse nel campo elettrico. Questa forza varierà in generale di grandezza e di direzione passando da un punto ad un altro del campo elettrico.

Come per i campi di forza in genere si intenderà per *intensità* del campo in un certo punto il valore della intensità della forza elettrica in quel punto.

§ 266. **Il potenziale elettrico.** — Per uno studio serio e profondo dei fenomeni elettrostatici si presentò la necessità di introdurre il concetto del *potenziale elettrico*, il quale mentre agevola grandemente lo studio, facilita anche l'enunciazione dei risultati. Esso è un elemento che esercita nella trattazione dei fenomeni elettrici un ufficio perfettamente analogo a quello della *temperatura* nei fenomeni termici. Il concetto di potenziate condurrebbe ad inesattezze e difficoltà per l'esposizione e lo studio dei fenomeni elettrici, quanto l'evitare di parlare di temperatura nello studio e nella descrizione dei fenomeni del calore. Del resto, la necessità dell'introdurre il concetto di potenziale era già sentita da alcuni elettricisti sino dal principio del secolo scorso. Il nostro grande Volta, prima della introduzione del concetto di potenziale sentì, con quella mirabile intuizione che lo caratterizzava, la necessità di usare l'espressione di *tensione assoluta*, precisamente col significato che ora ha il potenziale. Si sa che l'energia può presentarsi sotto diverse forme. Ed infatti più volte si è detto che oltre alle energie meccaniche (cinetica e di posizione) si hanno energie fisiche e chimiche. Così esiste una energia termica, esiste energia magnetica, energia luminosa ecc.

Ciò posto, s'immagini un piccolissimo corpo carico con una unità di elettricità positiva, e partendo da un punto determinato M di un campo elettrico si faccia muovere fino ad una distanza infinitamente grande.

In virtù della forza elettrica in M si metterà in giuoco un lavoro meccanico cui si dà il nome di *potenziale elettrico nel punto* M. Esso è indipendente dalla via che si fa percorrere al corpicciuolo elettrizzato; giacchè, se quel lavoro lungo due diverse vie fosse differente, si potrebbe far percorrere all'unità di elettricità una delle vie in un senso, e l'altra in senso contrario, con che, pur rimettendo a posto ogni cosa, si avrebbe un guadagno od una perdita di lavoro, e quindi la creazione o la distruzione di una certa quantità di energia, il che è contrario al principio della conservazione dell'energia.

$\dot{A}$ $\dot{B}$

Fig. 314.

È chiaro che il lavoro della forza elettrica relativo allo spostamento della unità di elettricità da un punto A ad un punto B (Fig. 314) è uguale alla differenza dei valori del potenziale in quei due punti.

§ 267. **Potenziale di un conduttore - Energia di un conduttore elettrizzato.** — Si dimostra facilmente che tutti i punti di un medesimo conduttore che possieda una carica in equilibrio, o di un sistema di più conduttori comunicanti fra di loro, hanno lo stesso potenziale, la qual cosa mostra come il potenziale disimpegni rispetto ai fenomeni elettrostatici una parte simile a quella della temperatura nei fenomeni termici, giacchè l'uguaglianza di potenziale è la condizione di equilibrio elettrico per un conduttore o per un sistema di conduttori

comunicanti precisamente come l'uguaglianza della temperatura è la condizione di equilibrio termico.

A B . C O

Fig. 315.

Il valore costante del potenziale per i vari punti di un conduttore si chiama *potenziale del conduttore* e si valuta apprezzando la differenza di potenziale fra il conduttore ed il globo terrestre considerato nel suo complesso, il cui potenziale si assuma come zero nella scala dei potenziali. L'unità di differenza di potenziale o di potenziale nel senso indicato che si è adottato nella pratica, ha ricevuto il nome di *volta*.

Corrisponde alla differenza di potenziale per la quale un *coulomb* dà il lavoro di un *joule*. Per Q *coulomb* che si spostino in virtù di una differenza di potenziale V, si avrà un lavoro

$$L = QV$$

se la carica Q cade tutta intera. Quando però si metta il corpo carico in comunicazione col suolo, si ha che durante la scarica il potenziale del corpo va decrescendo e se le prime parti della carica cadono dal potenziale iniziale V al potenziale zero del suolo, le ultime cadono da un potenziale assai prossimo allo zero. In questo caso si dimostra, e la cosa può in certo senso ritenersi intuitiva, che il lavoro è il medesimo come se la carica fosse caduta al potenziale zero da un potenziale medio fra quello iniziale e quello finale cioè dal potenziale $\frac{1}{2} V$. Il lavoro avrà quindi il valore

$$L = \frac{1}{2} QV. \qquad (72)$$

Questa espressione ci dà evidentemente anche il lavoro occorrente per dare ad un conduttore isolato la carica Q che lo porti al potenziale V, cioè la energia data colla carica al corpo.

Calcolando, in base alla definizione data, il potenziale elettrico in un punto O dovuto a cariche m_1, m_2, m_3 ecc. che si trovino (Fig. 315) in punti come A, B, C ecc. distanti rispettivamente da O di d_1, d_2, d_3... si trova che esso è dato dalla relazione

$$V = \frac{m_1}{d_1} + \frac{m_2}{d_2} + \frac{m_3}{d_3} + \cdots \qquad (73)$$

Ne segue che il potenziale si raddoppia, si triplica ecc., se si raddoppiano, si triplicano ecc. tutte le cariche elettriche.

Quindi, se esiste un solo conduttore elettrizzato, il suo potenziale è proporzionale alla sua carica.

§ 268. **Misura dei potenziali - Elettrometri.** — Si può dimostrare che mettendo in comunicazione mediante un filo lungo e sottile una sfera con un punto qualsiasi di un conduttore elettrizzato, questo le cede quantità di elettricità proporzionali al suo potenziale.

Si può quindi avere una misura relativa dei potenziali mediante la misura di cariche. Se si sostituisce alla sfera un elettroscopio a foglio d'oro, le foglie si caricheranno e la loro divergenza misurerà il potenziale. L'importante sarà di avere una buona graduazione per leggere le divergenze delle foglie.

Per la misura dei potenziali e delle differenze di potenziale si usa

anche l'*elettrometro a quadranti* (Fig. 317). Si compone essenzialmente di un ago leggerissimo in alluminio od in carta argentata, in forma di 8, e mobile all'interno di una scatola metallica (rappresentata schematicamente coll'ago *mn* nella Fig. 316) cilindrica divisa in quattro settori uguali detti quadranti. L'ago è sospeso mediante un filo di bozzolo e porta al disotto un filo di platino che sostiene un specchietto e che pesca in un recipiente contenente acido solforico concentrato. Lo specchio serve per la misura della deviazione (generalmente piccola) dell'ago a cui è collegato, con un metodo detto di *riflessione* e basato sul noto principio che il raggio riflesso corrispondente ad un raggio incidente sullo specchio ruota di un angolo doppio di quello di cui ruota lo specchio. (§ 152 e Fig. 149). Nella posizione di equilibrio l'ago è diretto secondo una linea di separazione dei quadranti e questi sono riuniti metallicamente due a due in modo alterno. Il tutto è contenuto in una scatola metallica munita di finestra e ben chiusa. Se le due coppie di quadranti si portano a potenziali uguali ma di segno contrario, l'ago si mantiene in equilibrio, a meno che non lo si ponga in comunicazione con un conduttore del quale si voglia conoscere il potenziale, e che questo sia diverso da zero; perchè in tal caso si ha una deviazione proporzionale al potenziale da misurare.

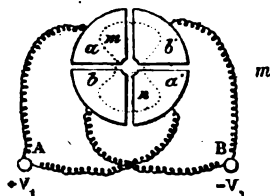
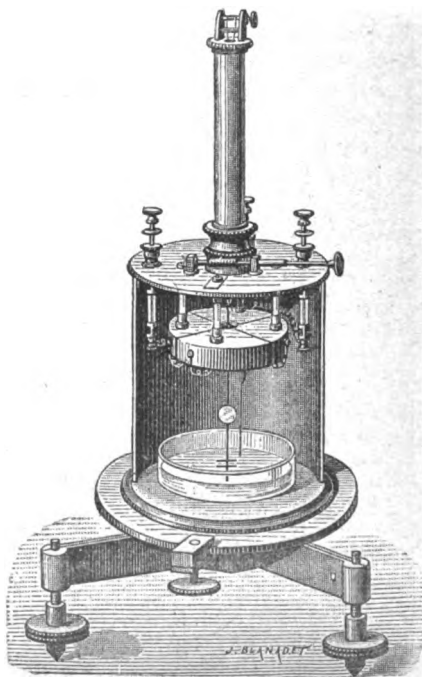



Fig. 316.

Fig. 317.

§ 269. Capacità di un conduttore - Farad e microfarad.

— Qualunque sia la carica Q di un determinato conduttore ed il potenziale V da esso assunto, il rapporto $C = \frac{Q}{V}$ fra carica e potenziale ha un valore determinato caratteristico del conduttore. Si chiama *capacità elettrica* del conduttore, e risulta misurata dallo stesso numero che misura la carica che si deve dare al conduttore perchè il suo potenziale si elevi di una unità. Conduttori di varia *capacità* portati allo stesso potenziale contengono cariche proporzionali alle rispettive capacità. L'energia di un conduttore elettrizzato può quindi scriversi anche:

$$\frac{1}{2} CV^2 \qquad (74)$$

ovvero:

$$\frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}. \qquad (75)$$

Nella definizione ora data di capacità si sottintende che il conduttore sia lontano da ogni altro conduttore (nel qual caso la capacità dipende solo dalla sua forma e dalle sue dimensioni) o che, se vi sono altri conduttori in presenza, questi sieno mantenuti in comunicazione colla terra, ossia al potenziale zero.

Se al conduttore ne sia vicino un altro non carico, non in comunicazione col suolo e ad un potenziale misurato da V_2, la capacità del primo conduttore sarà data dal rapporto fra la sua carica e la differenza fra i potenziali V_1 e V_2 dei due conduttori:

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2}. \qquad (76)$$

La capacità di un conduttore oltre che dalla sua forma, dalle sue dimensioni e dalle sue relazioni di posizione, dipende anche dalla condizione del mezzo circostante, caratterizzato da un coefficiente caratteristico dei vari mezzi che definiremo più avanti e detto *costante dielettrica* od altrimenti *potere induttore specifico*.

L'unità di capacità è il *farad*, ed è quella capacità che un *coulomb* porta ad un *volta*. Ha però un valore troppo grande e nella pratica non si adopera che un suo sottomultiplo, il *microfarad* che ne è la milionesima parte. La capacità elettrica della Terra è di 708 *microfarad*. Questo dia l'idea della entità del *farad*.

§ 270. **Superficie equipotenziali e linee di forza elettrica.** — Nel *campo elettrico* il potenziale ha in generale valori differenti da un punto ad un altro. Ma si può pensare a tutti i punti dello spazio, nei quali il potenziale ha uno stesso valore; essi costituiscono in generale colla loro successione una superficie, che dicesi *superficie equipotenziale* o *superficie di livello*. Così la superficie di un conduttore è una superficie di livello.

Fig. 318. - Linee di forza e superficie di livello per il caso di un conduttore sferico.

Sarebbe facile comprendere che in un punto qualunque d'una superficie di livello la forza è normale alla superficie. Sono quindi normali alle superficie di livello le *linee di forza*, vale a dire le linee che si possono immaginare nello spazio ad indicare in ogni punto la direzione della forza. Esse hanno la proprietà di essere in ogni loro punto tangenti alla direzione della forza agente in quel punto.

Fig. 319. - Campo elettrico determinato da due conduttori sferici *A* e *B* diversamente carichi.

Semplice disposizione di superficie di livello e di linee di forza, è quella appartenente al campo generato da una sfera elettrizzata Fig. (318).

Per simmetria si capisce facilmente che in questo caso le superficie

di livello sono le sfere concentriche al conduttore, e le linee di forza sono i raggi del medesimo indefinitamente prolungati.

È molto utile immaginare la superficie di livello e le linee di forza d'un campo elettrico specialmente se (in armonia con quanto si indicò nel § 262) si divide la superficie dei conduttori in parti unitarie, conducendo per i contorni loro linee di forza a costituire tubi di flusso unitari lungo il cui asse si immagina, a rappresentarli, una linea di forza, e si conducono infine le superficie di livello in corrispondenza a valori di potenziale che diversifichino successivamente di una unità. Si tratta in sostanza di una doppia divisione del campo in tubi ed in lamelle che porta a concamerazioni o cellette, la cui forma e le cui dimensioni, fisse le convenzioni, serviranno a fare bene conoscere la distribuzione della forza nel campo. Più numerosi saranno le linee di forza che attraversano una determinata area di superficie equipotenziale, e più elevato sarà il valore del flusso di forza attraverso ad essa e quindi più elevato sarà il valore della forza. Più numerose saranno per un determinato tratto le superfici equipotenziali che lo attraversano e più elevata sarà la differenza fra i valori del potenziale ai suoi punti estremi.

Ammettendo che un conduttore sia carico di elettricità in equilibrio la sua superficie è una *superficie equipotenziale.* Se così non fosse si avrebbe difatti movimento di elettricità dai punti a potenziale più elevato ai punti a potenziale più basso.

Esperienze numerose provano difatti che l'unica tendenza per la elettricità è (pressione o tensione elettrostatica) di sfuggire normalmente alla superficie.

§ 271. **Teoremi sul campo elettrico.** — Si dimostra che (Teorema di Gauss): *il flusso di forza elettrica attraverso ad una superficie chiusa qualsiasi considerata in un campo elettrico è indipendente da cariche elettriche esterne alla superficie ed è uguale al prodotto di* 4π *per la somma delle cariche interne alla superficie e della metà di quelle che si trovino sulla superficie.*

Da ciò risulta che (Teorema di Coulomb): *la forza elettrica in un punto prossimo alla superficie di un conduttore ha per valore* $4\pi\delta$, δ *essendo la densità superficiale nella regione prospiciente al punto.*

§ 272. **Tensione superficiale - Potere delle punte.** — La elettricità contenuta su di un conduttore è in ogni punto sollecitata a sfuggire dal conduttore in direzione normale alla superficie di questo da una forza detta *pressione* o *tensione superficiale* e ciò per la mutua ripulsione delle varie cariche.

Tale forza ha come risultato di diminuire l'effetto della pressione atmosferica alla superficie dei corpi elettrizzati. Così una bolla di sapone aumenta di volume quando la si elettrizzi. Van Marum ha anche dimostrato che se la bolla è gonfiata di idrogeno, la forza ascensionale di di essa aumenta per elettrizzazione. Designando con f la risultante delle azioni elettriche esercitantisi sulla elettricità contenuta in un elemento s appartenente alla superficie di un conduttore, e circostante un punto A di essa superficie, il limite del rapporto $\tau = \frac{f}{s}$ quando s tenda a zero, costituisce la tensione elettrostatica nel punto A.

In base ai teoremi del precedente paragrafo si può dimostrare la seguente relazione fra tensione e densità:

$$\tau = 2\pi\delta^2. \qquad (77)$$

la quale dice che la tensione cresce proporzionalmente nel quadrato della densità.

Nelle regioni di maggiore addensamento della elettricità, maggiore dunque è il pericolo della perdita di questa attraverso all'aria circostante, cosicchè se un conduttore ha una parte appuntita, la elettricità che gli si comunica si porta tutta sulla punta, che costituisce una porzione incurvatissima rispetto alle altre, e subito scompare. Si dice che l'elettricità è dispersa dalla punta mentre che in realtà, per un processo manifestantesi nell'aria circostante alla punta, va elettricità opposta a quella da essa posseduta a neutralizzarla, ed elettricità dello stesso nome si sposta in senso di allontanamento. L'effetto, per le condizioni dello ambiente circostante e per le condizioni finali del corpo, è lo stesso, e salva la riserva fatta, si può quindi continuare a parlare di dispersione di elettricità dalle punte e indicare siffatta possibilità di dispersione che hanno le punte colla usuale locuzione di *potere delle punte.*

CAPITOLO XXVI.

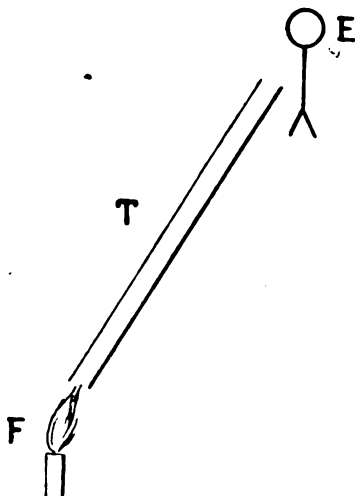
IONIZZAZIONE DEI GAS.

§ 273. **Ionizzazione.** — L'esperienza ha oramai dimostrato che le particelle di un gas possono scindersi ciascuna in due parti carica l'una positivamente e l'altra quantità uguale negativamente. Queste due parti si chiamano *ioni* (positivo l'uno e negativo l'altro) ed il processo di separazione delle particelle in ioni dicesi *ionizzazione.*

I gas caldi provenienti da una fiamma sono per gran parte ionizzati ed a provarlo basta collocare all'apertura inferiore di un tubo inclinato una fiamma dopo avere avvicinato all'apertura superiore del tubo la sfera di un elettroscopio carico per vedere come questo si scarichi qualunque sia il segno della carica e ciò per neutralizzazione di questa operata dai ioni di carica opposta (Fig. 320).

Fig. 320.

Varie sono le cause di ionizzazione. Principalmente la ionizzazione si ha per opera di certi raggi chiamati X o del Röntgen (§ 281), dei raggi emessi da certi corpi detti radioattivi (§ 282), dall'urto di ioni dotati di sufficiente velocità contro molecole neutre.

La ionizzazione si ha anche in prossimità di punte alle quali si conferisca elettricità per lo stato elettrico nel quale esse vengono portate in conseguenza dell'addensamento della elettricità.

§ 274. **Spiegazione del potere delle punte.** — Allora si capisce che cosa deve succedere vicino ad una punta. Per le condizioni elettriche di questa, l'aria che le sta vicina si ionizza, verificandosi in essa la formazione di ioni positivi e negativi. Se la punta ha

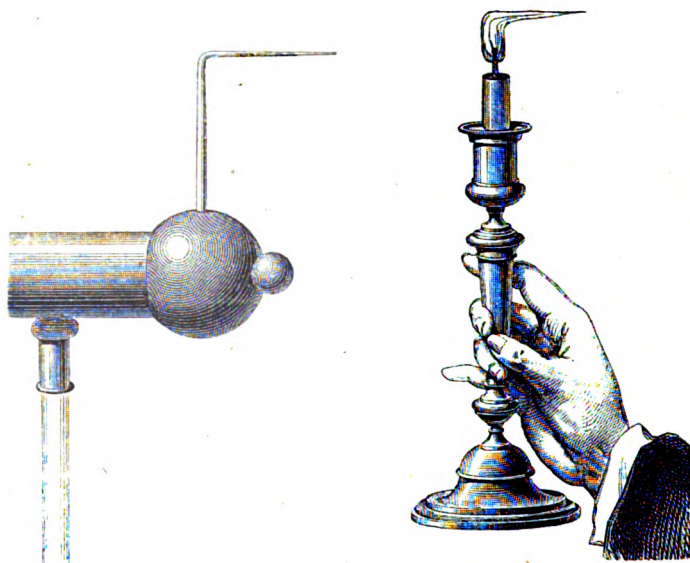



Fig. 321. - La dispersione da una punta può determinare l'inflessione ed anche lo spegnimento di una candela.

elettricità negativa, i ioni positivi vengono da essa attratti e vanno a scaricarla, i negativi invece vengono lanciati a distanza. Se la punta ha elettricità positiva, i ioni negativi vengono attratti da essa e la scaricano, mentre i positivi vengono lanciati a distanza.

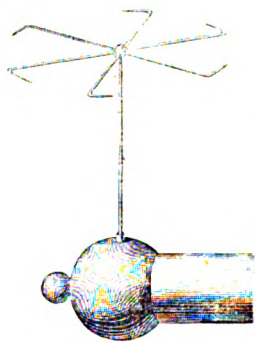



Fig. 322.

Nell'un caso e nell'altro la punta si neutralizza e sembra quindi perdere elettricità. Nel contempo, per l'allontanamento da essa di ioni a carica opposta, l'aria si agita e si ha l'impressione di un venticello particolare procedente dalla punta. Si parla abitualmente di venticello elettrico che si avverte avvicinando una mano ad una punta, cui si conferisca con continuità una carica elettrica. Esso si mette in rilievo avvicinando ad una punta in siffatte condizioni una candela accesa; la fiamma della candela si piega (Fig. 321).

Con un molinello formato da diverse punte piegate, come indica la Fig. 322, poggiato con un cappelletto su una punta metallica e mobile con debole attrito su questa si può mostrare l'effetto di reazione corrispondente al moto di allontanamento dell'aria dalle varie punte rivolte tutte nello stesso senso. Il molinello difatti, quando gli si conferisce con continuità una carica elettrica, ruota in senso contrario a quello verso cui sono rivolte le punte.

I corpi che debbono mantenere cariche elettriche si costruiscono

sempre in modo che non presentino spigoli o punte. Nelle parti terminali loro si fanno arrotondati. Questa è la ragione per la quale i vari apparecchi sinora considerati nelle esperienze varie da noi indicate terminano tutti con parti arrotondate.

Un curioso effetto della abbondante dispersione elettrica delle punte

Fig. 323.

Fig. 324.

è quello di dissipare la nebbia. Esso è stato sperimentato su larga scala in Inghilterra. Una regione nella quale si trovava la villetta rappresentata dalla Fig. 323 era coinvolta da nebbia densissima. La copiosa dispersione elettrica da numerose punte predisposte a siepe intorno alla villetta, determinò la rapida dissipazione della nebbia. La Fig. 323 rappresenta la piccola villa quasi oramai libera dalla meteora, e la Fig. 324 la rappresenta libera. Oltre alla nebbia si dissipa anche il fumo.

CAPITOLO XXVII.

MACCHINE ELETTRICHE.

§ 275. **Macchine elettriche.** — Un sistema di conduttori elettrizzati è sede di energia il cui valore dipende dalla posizione reciproca dei corpi medesimi e può variare in generale per effetto del movimento loro.

Queste variazioni di energia sono collegate colla produzione o col consumo di lavoro meccanico che, per le forze esercitate fra tali corpi, si effettuano nel movimento. Per una tale via si può produrre quindi energia elettrica ossia cariche elettriche a spese di lavoro e viceversa.

Si chiamano *macchine elettriche* sistemi opportuni a produrre a spese di lavoro meccanico delle cariche elettriche.

E sono di due tipi principali, a strofinio e ad influenza. Le prime sono oramai pochissimo usate, in quanto hanno preso il loro posto e lo mantengono con onore le macchine ad influenza, di gran lunga più comode ed efficaci e per le quali non si deve lamentare notevole dissipazione di energia in calore per causa di attriti.

§ 276. **Macchine a strofinìo.** — Descriviamo ora una *macchina a strofinìo.*

È costituita da un disco di vetro (Fig. 325) che può girare intorno ad un asse passante pel suo centro e ad esso perpendicolare, fra due *cusci-*

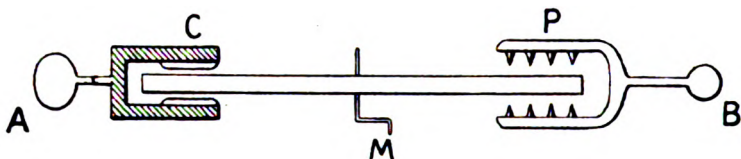



Fig. 325.

netti C disposti uno per parte all'estremità di un suo diametro. All'estremo di altro diametro sono rivolte verso il disco tante punte metalliche *P* fissate a due pezzi metallici in forma varia, i quali comunicano con un conduttore *B* isolato: sono i cosidetti *pettini.* Per la rotazione del disco ogni settore di esso si strofina contro i cuscinetti e passa fra i pettini: questo alternativamente ed indefinitamente, sino a che duri la

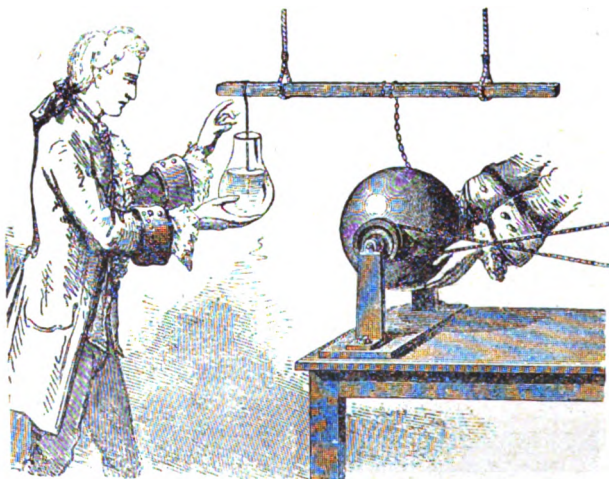



Fig. 326.

rotazione del disco. Il disco collo sfregare sui cuscinetti, si elettrizza positivamente, mentre i cuscinetti si elettrizzano negativamente. I cuscinetti, comunicano con un conduttore sferico *A* che può rimanere isolato, ma che si suole far comunicare col suolo mediante una catenella metallica, perdono la carica, mentre la parte strofinata del disco conserva la sua elettricità finchè arriva ai denti dei pettini.

Quivi la carica agisce per influenza sul conduttore elettrizzando negativamente le sue parti più vicine, ossia le punte dei pettini, e positivamente il conduttore con essi comunicante. L'elettricità positiva rimane sul conduttore, e la negativa sfugge dalle punte sul disco a

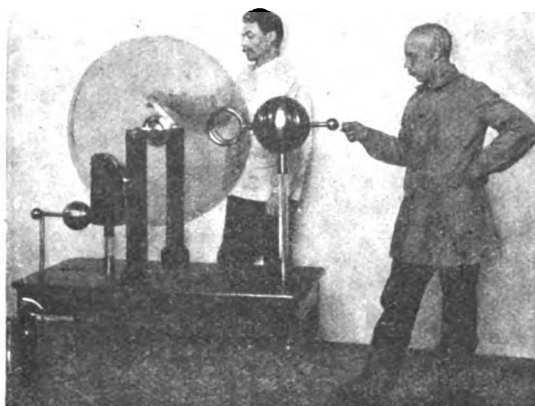



Fig. 327. - Macchina a strofinio. I cuscinetti sono in basso a sinistra e comunicano con un conduttore sferico isolato. I pettini in forma circolare sono a destra e comunicano con un conduttore pure isolato.

neutralizzare la elettricità contraria che vi trova. Il giuoco si ripete continuamente finchè dura la rotazione. L'elettricità positiva, quindi, si accumula a poco a poco sul conduttore. Se il movimento del disco

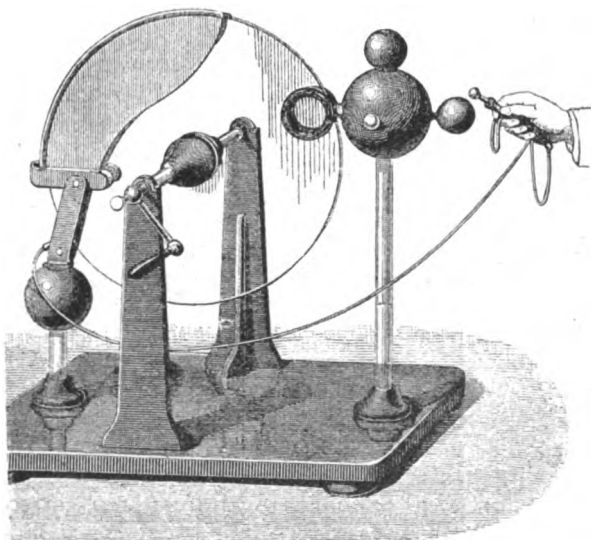



Fig. 328. - Macchina a strofinio detta di Winter. Invece di pettini vi sono due cerchi di legno che aderiscono al vetro.

cessa, per la dispersione delle punte, anche il conduttore perde la carica.

La elettricità negativa si potrebbe raccogliere dal conduttore comunicante coi cuscinetti.

Nella prima macchina elettrica ideata da Ottone di Guerike l'isolante che ruotava consisteva in una sfera di zolfo. Essa veniva ad elet-

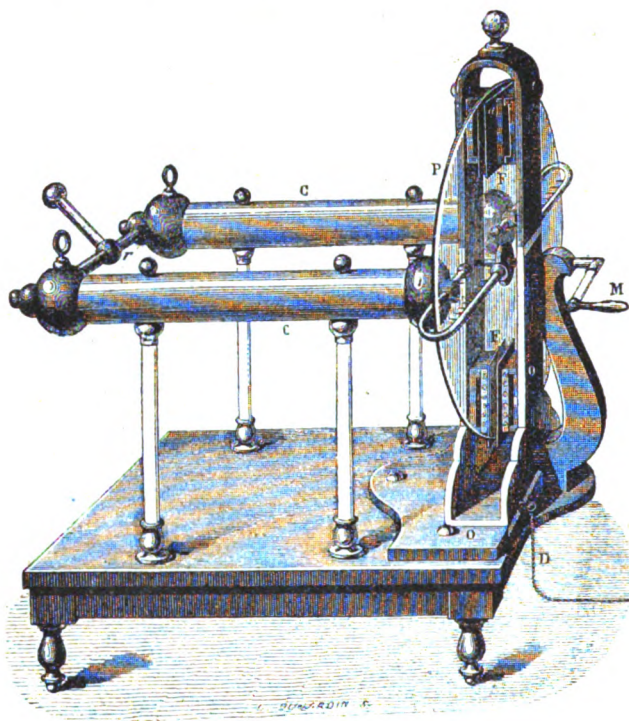



Fig. 329. - Macchina detta di Ramsden. In essa ogni settore del disco di vetro opera due volte per ogni giro giacchè sono due le coppie di cuscinetti e due le coppie di pettini. Queste ultime comunicano con un unico conduttore $C + C$.

trizzarsi per strofinamento contro le mani dello sperimentatore, e la sua carica veniva raccolta mediante contatto da una catenella (Fig. 326).

Il metodo di raccoglimento mediante il conduttore a punta venne assai più tardi ideato da Wilson. Vedansi anche le figure 327, 328 e 329.

§ 277. **Macchine ad influenza.** — Macchina ad infuenza in certo modo rudimentale è l'*elettroforo*, composto (Fig. 332) di un disco di resina (schiacciata) cui se ne sovrappone un altro metallico più piccolo (scudo) e fornito d'un manico isolante. Se si strofina la resina con un pannolano, o con una pelle di gatto, le si sovrappone lo scudo, si fa comunicare questo col suolo togliendo questa comunicazione e sollevandolo subito dopo, si ha che lo scudo si trova carico di elettricità positiva, tanto da dare una piccola scintilla con un conduttore comunicante col suolo.

Si tratta evidentemente di una carica per influenza data allo scudo. Le figure 333 e 334 illustrano abbastanza bene il modo di usare ed il comportamento dell'elettroforo. Il giuoco senza nuovo strofinamento, può a lungo ripetersi e accumulare in un conduttore isolato le piccole cariche ottenute volta per volta. Le *macchine elettriche ad influenza*, si distinguono in macchine ad influenza semplice e a doppia influenza.

Le macchine a semplice *influenza* funzionano secondo lo schema della Fig. 330. Si dà una carica, positiva ad esempio, al conduttore A

e si mette in rotazione il disco isolante *LN*. La carica positiva di *A* agisce per influenza sul conduttore *BC* suscitando una carica negativa nella parte *B* ed una positiva nella estremità *C*. La carica negativa sfugge dalle punte sul disco e viene da questo trascinata di fronte al conduttore *DE* che per tal modo si carica per influenza di elettricità positiva in *D* e di elettricità negativa in *E*. La carica positiva sfugge dalle punte sul disco neutralizzando la carica negativa di questo, che così ritorna col settore considerato in questa prima azione, fra *A* e *BC* per la ripetizione delle medesime vicende che successivamente si rinnovano per ogni settore del disco, conferendo continuamente cariche utilizzabili positiva in *C* e negativa in *E*. *C* ed *E* si dicono i *conduttori* della macchina o anche *poli* della macchina.

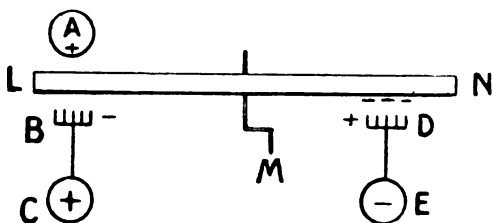



Fig. 330.

Occupiamoci ora delle *macchine a doppia influenza.*

L'estremo del conduttore *B* rivolto verso il conduttore *A* caricato positivamente (Fig. 331) porti una o più punte acute, e un disco isolante, in vetro ad esempio, passi con moto continuo fra *B* ed *A*. La carica negativa di *B* passerà dalle punte al vetro, e questo la porterà di fronte ad altro conduttore *C* appuntito in *p* così che la carica sfuggente da *p* neutralizzerà la influenzante del disco. Questo conduttore *C* agisca per influenza su di un conduttore *D* simile a *B*. Le punte di *D* disperderanno elettricità positiva che proiettata sul vetro arriverà ad agire per influenza su *A*, così da aumentarne la carica positiva, mentre la punta in *a* di *A* medesimo, neutralizza la carica influenzante del disco.

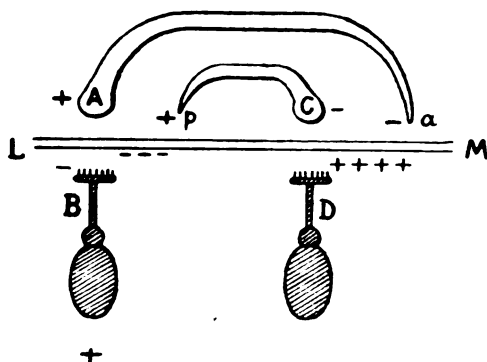



Fig. 331. - Una macchina ad influenza schematica.

Di questo tipo la macchina di Holtz è una delle più adoperate (Fig. 339, 340, 341).

Altre macchine ad influenza sono rappresentate dalle figure 336, 336 *bis*, 337 e 342.

Le macchine ora descritte, richiedendo una carica iniziale, si chiamano *non autoeccitabili* per distinguerle da altre macchine ad influenza una delle quali è quella di Wimshurst (Fig. 342, 343), che si chiamano *autoeccitabili* perchè non richiedono la carica iniziale. Altra distinzione si fa in macchine ad *isolante mobile,* nelle quali è un isolante mobile (quali la Holtz ecc.) e in macchine a *conduttori mobili* nelle quali è una serie di conduttori mobili. Tali quella ad acqua di lord Kelvin (Fig. 335 e 335 *bis*) l'elettroforo, il ricaricatore, la macchina di Wimshurst ecc.

Macchine elettriche ad influenza.

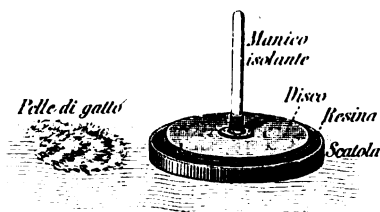
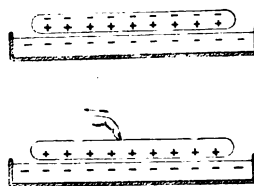



Fig. 332. *Fig. 333.*

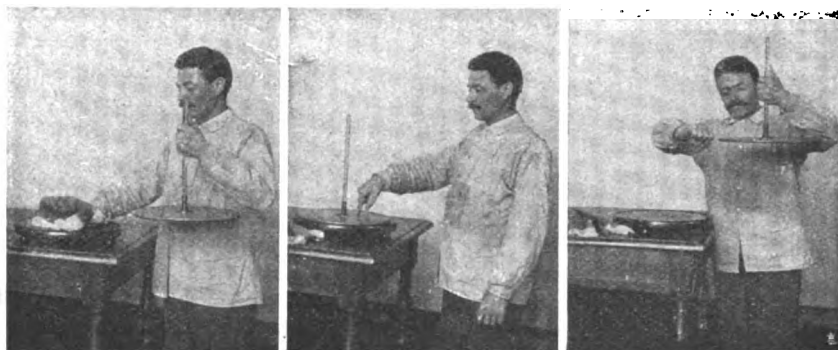



Fig. 334.

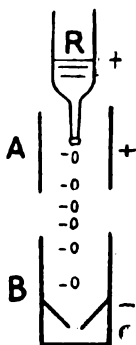



Fig. 335.

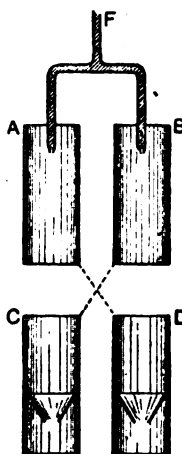



Fig. 335 bis.

L'acqua contenuta nel recipiente *R* può sgocciolare con continuità in modo da scorrere lungo l'asse del cilindro metallico *A* e da cadere nel recipiente metallico *B*. Se si dà una piccola carica (positiva per esempio) ad *A*, l'acqua contenuta in *R* si elettrizza per influenza di elettricità negativa nella regione da cui si staccano le gocce e di elettricità positiva nella regione lontana. Le gocce staccandosi trasportano con loro la elettricità negativa e la cedono al conduttore *B* che per tal modo si carica di più in più e può cedere la elettricità che riceve. Col dispositivo doppio della figura vicina si può ottenere una moltiplicazione di effetti e anche la produzione continuata di elettricità dei due segni. Acqua (Fig. 335 *bis*) che sgoccioli con continuità dagli estremi affilati dell'indicato tubo di vetro biforcato trasporta le cariche ricevute per influenza da una carica iniziale (positiva o negativa) data ad uno dei conduttori tubulari *A* o *B* sino a caricare i conduttori metallici cilindrici *C* e *D* nei quali va a cadere. Per il collegamento di *A* con *D* e di *B* con *C* si vanno moltiplicando gli effetti di influenza e quindi le cariche raccolte ed utilizzabili.

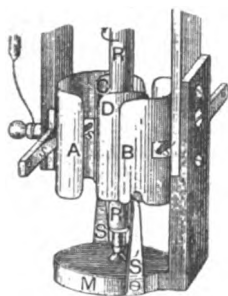



Fig. 336.

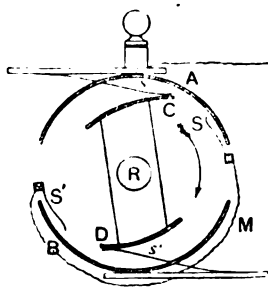



Fig. 336 bis.

L'apparecchio che qui è rappresentato in prospettiva ed in sezione porta la denominazione di *ricaricatore Thomson* ed è in fondo una macchina ideata dall'italiano Belli, da lui chiamata *duplicatore* e che a sua volta fu una derivazione dell'elettroforo del Volta; la seconda macchina ad influenza quindi, in ordine di tempo. Per spiegarne il funzionamento basta pensare che i conduttori *CD* sostenuti da una asta isolante, capaci di ruotare intorno ad un asse *R* e sfiorare successivamente le molle *SS'* collegate fra loro metallicamente mediante il filo *M* e le molle *ss'* collegate ai due conduttori cilindrici *AB*; corrispondono alle gocce d'acqua della macchina doppia a sgocciolio, le molle *SS'* agli estremi dei due tubi di efflusso dell'acqua, le parti sinistra del conduttore *A* e destra del conduttore *B*, ai conduttori *A* e *B'* e le molle *s* ed *s'* ai conduttori *C* e *D*.

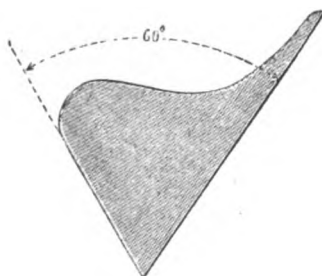
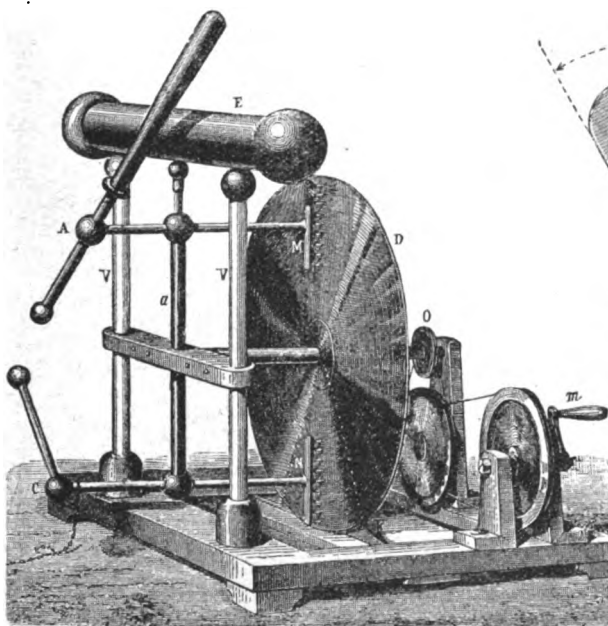



Fig. 338.

Fig. 337. - Macchina ad influenza di Bertsch. Il disco isolante che ruota è in ebanite (*D*). Per il sistema conduttore *AEM* sostenuto da piedi isolatori *VV* si ha l'andamento di fatti indicato per il conduttore *B* della Fig. 327 nel ragionamento della pag. 237.

La parte del corpo *A* viene in tale macchina esercitata da un settore elettrizzato (Fig. 338), che si pone per l'inizio del funzionamento al di là di *D* di fronte ad *M*.

La carica dispersa dalle punte in *M* sul disco, viene portata, per la rotazione di questo, di fronte ad *N*, e subito dopo neutralizzata dalla carica opposta che per influenza vi suscita e che immediatamente si disperde dalle punte. In *C* si raccoglie la quantità di elettricità omonima equivalente a quella dispersa da *N*.

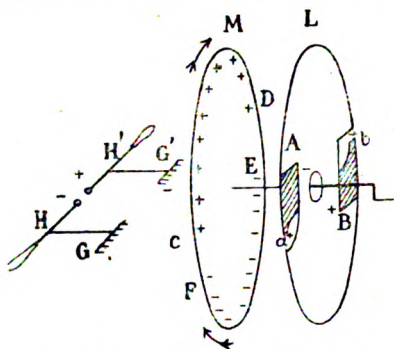



Fig. 339. - Come si realizza in una macchina di Holtz lo schema della Fig. 327. I conduttori A e B sono in carta e sostenuti da un disco di vetro fisso munito di finestre per lasciar libere le punte a e b. Il senso di rotazione del disco mobile è tale per cui nel movimento si va incontro alle punte dei conduttori adattati sul disco fisso.

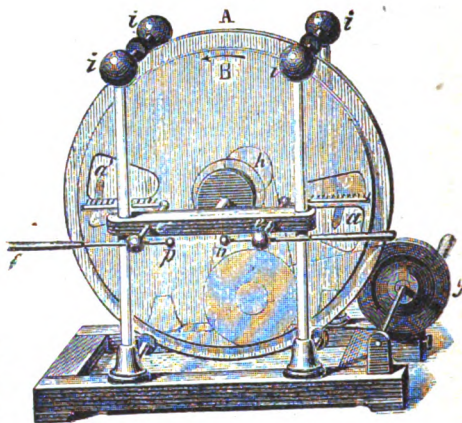



Fig. 340. - La macchina di Holtz montata.

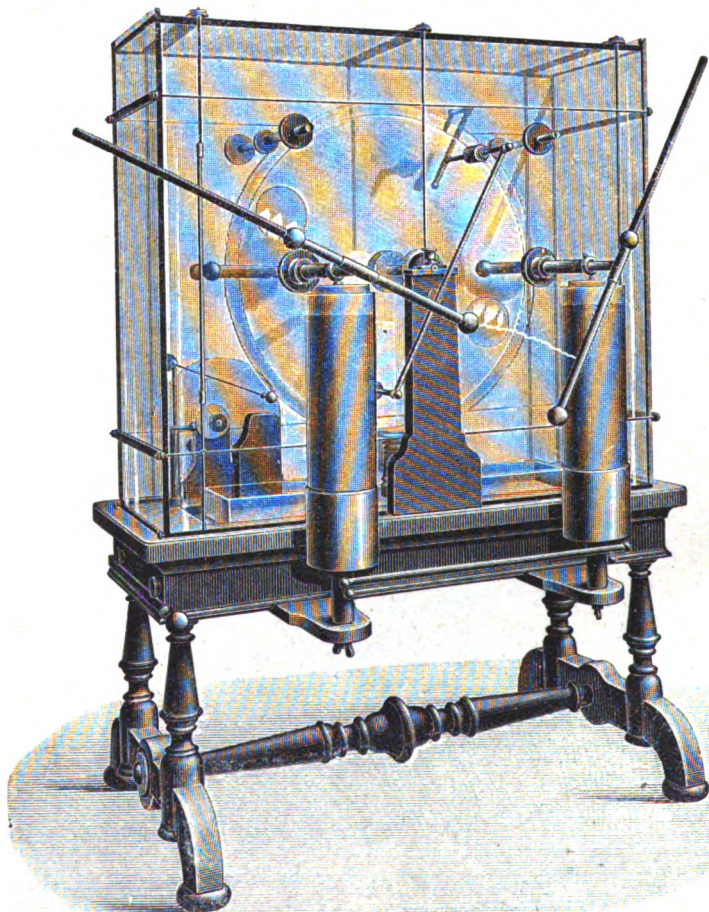



Fig. 341. - Altra macchina elettrica di Holtz a quattro dischi. I due bastoni (conduttori) metallici terminati da sfere recano l'uno elettricità positiva e l'altro elettricità negativa. Fra i conduttori principali della macchina vedesi una scintilla fatta scoccare dopo avere resa oscura la camera in cui fu presa la negativa. È chiusa in una cassa di vetro per poter rendere con sostanze essicanti ben asciutto l'ambiente ove si trova. A sinistra si vede il disco di una piccola macchina a strofinio per la eccitazione.

Fig. 342.

Fig. 342. - Macchina di Wimshurst. È costituita da due dischi uguali e paralleli isolanti (micanite, ebanite, vetro) capaci di ruotare in senso inverso e muniti nelle facce non prospicienti di piccoli settori metallici equidistanti. In corrispondenza degli estremi del diametro orizzontale i due dischi sono abbracciati da due coppie di pettini metallici comunicanti ciascuna con un conduttore della macchina (tali conduttori essendo ordinariamente muniti di manico isolante e disposti in guisa da potersi mettere a contatto o da allontanarsi più o meno, come in genere in tutte le macchine moderne), contro a due diametri dei due dischi, formanti fra loro un angolo di circa 90°, sono sulle due facce esterne adattati due conduttori muniti agli estremi di spazzolini metallici contro i quali durante la rotazione dei dischi vanno a sfiorare i settori metallici su questi fissati.

Fig. 343.

Fig. 343. - Lo schema della figura rappresenta una macchina di Wimshurst. I due dischi son rappresentati mediante le sezioni rette di due cilindri coassiali e i settori dalle prominenze della superficie interna del cilindro interno, della superficie esterna del cilindro esterno. È evidente la rappresentazione delle altre parti. Per intendere il funzionamento della macchina basta ammettere che un settore, del cilindro esterno ad esempio, abbia una piccola carica (la cosa si verifica sempre per uno dei numerosi settori, donde la circostanza che la macchina è autoeccitabile) per esempio positiva. Quando per il moto della macchina il settore carico si porti di fronte al conduttore formato dai due settori n_1 ed n_2 dell'altro disco e dall'asta metallica munita di spazzolino, n_1 si carica negativamente per influenza ed n_2 positivamente. Portandosi n_1 ed n_2 per il moto della macchina di fronte al conduttore analogo n_3 n_4 trascurano la carica ricevuta e la utilizzano per caricare per influenza, n_4 positivamente ed n_4 negativamente. Si moltiplicano quindi i settori nelle condizioni del primo considerato e nelle condizioni di n_3 ed n_4, e in breve si ha che alla copia di pettini rappresentata nella regione sinistra si portano di fronte successivamente settori carichi di elettricità positiva ed alla coppia di pettini rappresentata nella regione destra conduttori carichi negativamente. Ognuno dei primi carichi per influenza negativamente i pettini e positivamente il conduttore della macchina con questi comunicante, ed ognuno dei secondi carica positivamente i pettini e negativamente l'estremo del conduttore con questi collegato. I pettini disperdendo la carica ricevuta, neutralizzano i settori che ritornano in circolo elettricamente neutri e quindi in condizioni da ripetere indefinitamente le indicate funzioni. I conduttori della macchina ricevono invece cariche crescenti utilizzabili. Il senso di rotazione per ogni disco è tale che nell'andare da uno spazzolino alla coppia di pettine percorre la strada più lunga.

CAPITOLO XXVIII.

PROPAGAZIONE DELL'ELETTRICITÀ.

§ 278. **Propagazione tranquilla ed esplosiva nei solidi nei liquidi e nei gas.** — Abbiamo avuto occasione di parlare di corpi buoni conduttori della elettricità in contrapposto a corpi cattivi conduttori; ma non ci siamo soffermati sulla questione del modo di passare della elettricità attraverso ai corpi che la possono condurre. È bene dire qualche parola su tale argomento veramente interessante. A tal fine, facciamo distinzione fra i corpi solidi, i liquidi e gli aeriformi, per quanto le manifestazioni esteriori ed il meccanismo di propagazione abbia analogia nei vari stati di aggregazione.

Due procedimenti estremi di passaggio, o, come talvolta si dice, di *scarica* o di *corrente* sono: 1° quello per cui il passaggio stesso avviene con durata grande o piccola, in modo *tranquillo*, senza sensibili manifestazioni meccaniche; 2° quello per cui il fenomeno, essendo di breve durata, è anche *brusco, esplosivo, irrompente*, con sensibili manifestazioni meccaniche.

Propagazione nei Solidi.

Processo tranquillo, senza manifestazioni meccaniche. — Si ritiene che con questo processo nei *solidi* la elettricità si propaghi per spostamento vero e proprio degli elettroni.

Debba passare elettricità da un corpo *A*, carico ad esempio negativamente, ad uno *B*, mediante un filo metallico. Prima di usare questo filo di comunicazione, *B* si caricherà per influenza di *A*, in una misura più o meno forte, positivamente nelle regioni più vicine e negativamente nelle lontane.

Mettendo il filo di comunicazione, per la mutua ripulsione fra gli elettroni caricanti il corpo *A*, alcuni di essi vengon subito spinti attraverso al filo metallico stesso sino, a portarsi nel corpo *B* a ciò anche invitati dalla carica positiva di *B*, che come l'altra carica per influenza, scompare subito dopo l'intervento del filo di comunicazione. Non è difficile intendere quello che deve avvenire per la comunicazione di una carica positiva.

Processo esplosivo od irrompente. — Nei solidi poco conduttorì, quando siano verificate condizioni opportune, la scarica può assumere carattere esplosivo in modo analogo a come diremo più sotto per il caso dei liquidi e dei gas. La scarica determina una lacerazione del materiale che attraversa. Si citano effetti di questo genere a comprovare una azione meccanica della scarica elettrica.

Propagazione nei Liquidi.

Processo tranquillo, senza manifestazioni meccaniche. — Nei *liquidi* la propagazione con questo processo si ritiene che avvenga per convezione di ioni in essi contenuti.

Per intenderlo, supponiamo che un corpo *A* (Fig. 344) comunichi mediante un filo metallico con un estremo in una massa liquida situata nel recipiente *R*, e che mediante un altro filo si vada dall'altro estremo della massa liquida ad un corpo *B*. Questi fili che servono all'ingresso ed all'uscita della elettricità nel liquido si chiamano *elettrodi*. Il recipiente *voltametro*. O il liquido conduce, e allora va elettricità da *A* a *B*, o non conduce, e la elettricità di *A* rimane in *A*. Se il liquido conduce viene chiamato *elettrolita*, se no, si dice non elettrolita. Ebbene, se è elettrolita, a meno di eccezioni, indubbiamente è o un corpo fuso o una soluzione in acqua od in altro liquido di un qualche altro corpo, che potrà entrare magari per piccole tracce e che in parte avrà le sue particelle scisse in due porzioni, l'una *ione positivo* e l'altro *ione negativo*.

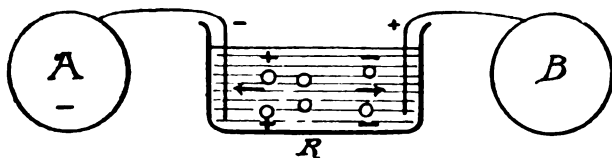



Fig. 344.

Perchè un liquido che conduca, che sia cioè elettrolita, secondo la ipotesi molto probabile di Arrhenius, ha nella sua massa dei ioni positivi e dei ioni negativi, oltre ad altre particelle del corpo da cui derivano i ioni, non ancora scisse.

Dovendo essere il corpo che si dissocia o un acido, od un sale, od una base, potremo dire che tutto porta a ritenere (ipotesi di Arrhenius) essere ione positivo per il caso dell'acido, l'idrogeno che vi entra, e per il caso del sale o della base il metallo. Per tutti e tre i casi è ione negativo il residuo o radicale. Così per l'acido solforico H_2 è ione positivo (*catione*) ed SO_4 è ione negativo (*anione*); per la potassa caustica, K è ione positivo ed OH ione negativo; per il solfato di sodio Na_2 è ione positivo ed SO_4 è ione negativo.

Ammettiamo che il liquido del recipiente R sia un elettrolita, e vediamo come esso conduce la elettricità.

Per la carica negativa di A e del filo che da esso va in R, il filo che da R va al corpo B assume per influenza elettricità positiva, e l'estremità lontana del corpo elettricità negativa. Ioni positivi e ioni negativi del liquido si muoveranno attraverso a questo in senso opposto; attratti gli uni dal filo di A, gli altri dal filo di B, e cederanno la loro carica, mentre altre particelle si ionizzeranno ed essi ricostituiranno nuove particelle neutre. A poco a poco, e ciò in brevissimo tempo, l'elettricità di A verrà neutralizzata ed il corpo B assumerà tanta elettricità negativa quanta ne aveva A. Il risultato finale sarà quello stesso come se la elettricità di A fosse passata direttamente nel corpo B.

Il passaggio di elettricità attraverso ad un liquido avviene dunque fra i conduttori che mettono gli estremi della massa liquida in comunicazione coll'esterno cioè gli elettrodi. Quando avviene il passaggio della elettricità sempre uno è carico positivamente e l'altro negativamente se non altro per influenza. Il primo si chiama *elettrodo positivo* o *anodo*, l'altro *elettrodo negativo* o *catodo*. Poichè adduce ioni agli elettrodi, il passaggio della elettricità attraverso ai liquidi corrisponde in certo modo alla scomposizione del corpo dissociato in due parti.

Leggi di Faraday. — In questa scomposizione detta *elettrolisi* si verifica:

1. *Che la quantità di elettrolita decomposto è proporzionale alla quantità di elettricità che l'ha attraversato.*

2. *Che una medesima quantità di elettricità libera da elettroliti diversi, quantità di corpi semplici proporzionali ai loro equivalenti chimici (peso atomico diviso per la valenza).*

Così una medesima quantità di elettricità, libera, passando attraverso a voltametri contenenti liquidi differenti, quantità relative di elementi che si possono facilmente calcolare dividendo i pesi atomici degli elementi per le rispettive valenze. Se un elemento entra in due voltametri con due valenze diverse (caso del rame o del mercurio o altro), le quantità di elemento liberate sono in ragione inversa della valenza dell'elemento stesso (di rame rameico si libera la metà che di rame rameoso, di mercurio mercurico la metà che di mercurio mercuroso ecc.).

L'equivalente chimico di un corpo non va confuso coll'*equivalente elettrochimico*, quantità in peso di esso liberata da un *coulomb*. Indichiamo l'equivalente elettrochimico di qualche corpo:

Idrogeno	0,000010449
Ossigeno	0,000082928
Rame (bival.)	0,00032948
Argento	0,0011183
Oro	0,00068139

Processo irrompente o scarica esplosiva. — Nei liquidi poco conduttori od isolanti il passaggio della elettricità può avvenire, se si verificano condizioni determinate, in modo esplosivo, analogamente a come abbiam detto avviene nei solidi poco conduttori e come diremo per il caso dei gas.

PROPAGAZIONE NEI GAS.

Processo tranquillo. — Con questo processo nei *gas* le cose avvengono in modo perfettamente analogo a quello indicato per i liquidi. Occorre quindi che abbiano alcune loro particelle scisse in ioni, o, come si dice, *ionizzate*, perchè si realizzi il passaggio attraverso ad essi dell'elettricità. E siccome per i gas la ionizzazione richiede un'azione esteriore, a differenza dei liquidi per i quali l'azione è interna e dovuta al solvente che sempre permane, occorre per il trasporto da A a B (Fig. 345) di elettricità attraverso il gas interposto fra le due lamine C e D, un'azione ionizzante continuativa.

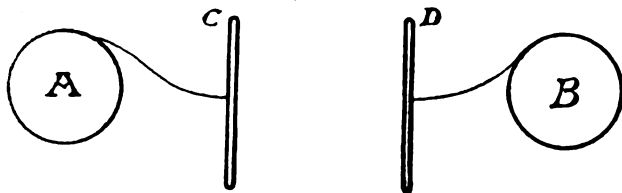



Fig. 345.

Il lettore può ripetere, al riguardo del dispositivo che rappresenta la Fig. 345, il ragionamento fatto più sopra per i liquidi, ammettendo che A sia carico una volta positivamente ed una volta negativamente. Del pari può per esercizio rendersi conto dello scaricarsi a terra di un elettroscopio E attraverso all'aria ionizzata fra A e B (Fig. 346).

Sebbene non nell'uso, la propagazione della elettricità attraverso ai solidi si potrebbe chiamare *conduzione*, quella attraverso i liquidi *elettrolisi* e quella attraverso ai gas *convezione*.

Teniamo fin d'ora presente che se il meccanismo di propagazione della elettricità nei liquidi è in fondo analogo a quello che si verifica nei gas, non vanno confusi per la costituzione e per l'origine i *ioni elettrolitici*, che sono frammenti ben determinati delle molecole del corpo disciolto o fuso, ed i *ioni gassosi*, che sono frammenti a costituzione non determinata.

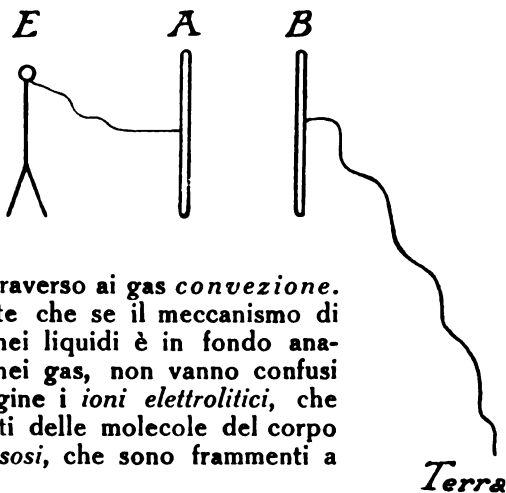



Fig. 346.

Processo irrompente - Scintilla. — Una forma di passaggio della elettricità attraverso un gas è quella per cui con processo rapidissimo, detto esplosivo, si ha formazione di una *scintilla*, tratto luminoso brillantissimo, che si forma tra due corpi opportunamente carichi o fra un corpo carico ed un altro che gli si avvicini e che si carichi per ciò per influenza del primo.

Si può avere una scintilla avvicinando la nocca di un dito ad un conduttore di una macchina elettrica. Meglio si può osservare la scintilla facendola scoccare fra due conduttori, quali sono le sfere del cosidetto *spinterometro*, formato di due parti ravvicinabili ed allontanabili. Basta a tal fine operare la comunicazione, mediante opportuni conduttori, delle due parti ravvicinabili ed allontanabili dello spinterometro, coi due poli di una macchina elettrica, e portare le sfere alla *distanza esplosiva* conveniente.

La scintilla è un fenomeno di una rapidità considerevole; ha forte potere calorifico e può determinare azioni meccaniche marcate. Si ritiene che l'intimo meccanismo della scintilla non differisca in fondo, salva la rapidità e qualche modificazione a questa conseguente, dalla scarica tranquilla e lenta indicata nel paragrafo precedente.

§ 279. **Potenziale esplosivo - Fiocco - Stelletta.** — Perchè scocchi la scintilla fra due conduttori affacciati occorre che fra di essi esista una conveniente *differenza di potenziale* detta *esplosiva* alla quale suol darsi brevemente la denominazione di *potenziale esplosivo.*

A parità di tutte le altre circostanze tale potenziale esplosivo cresce colla distanza dei conduttori, ma non proporzionalmente.

Fissa la distanza varia al variare della forma dei conduttori. In particolare è minore fra una punta positiva e un disco piano negativo che non fra una punta negativa ed un disco positivo.

Se i conduttori hanno una distanza superiore alla *esplosiva*, per la differenza di potenziale fra essi esistente, si nota nella oscurità un fenomeno luminoso nelle regioni prospicienti dei conduttori, e precisamente un *fiocco* al conduttore positivo ed una *stelletta* al conduttore negativo.

Il fenomeno luminoso attesta un processo di scarica silenziosa.

Fig. 347. - Un recipiente di vetro attraversato da conduttori metallici, e tale che, mentre in esso può rarefarsi l'aria, sia possibile farlo attraversare dalla scarica elettrica.

§ 280. **Scarica nei gas rarefatti - I raggi catodici.** — Degna di nota particolare è la scarica che si effettui in gas rarefatto entro ad un tubo. Essa si manifesta con una quieta luminosità che varia di colore e di costituzione al variare della forma e della sezione del tubo. Per produrre tali scariche si dispone di tubi di vetro attraversati da fili di platino, che servono a mettere in comunicazione gli estremi della massa gassosa coi due poli della macchina fornitrice della elettricità. Fili o cilindri o dischi di alluminio che terminano nell'interno i fili di platino, ricevono il nome di *elettrodi* e si dà più specialmente il nome di *anodo* a quello comunicante col positivo, di *catodo* a quello comunicante col polo negativo (Fig. 347).

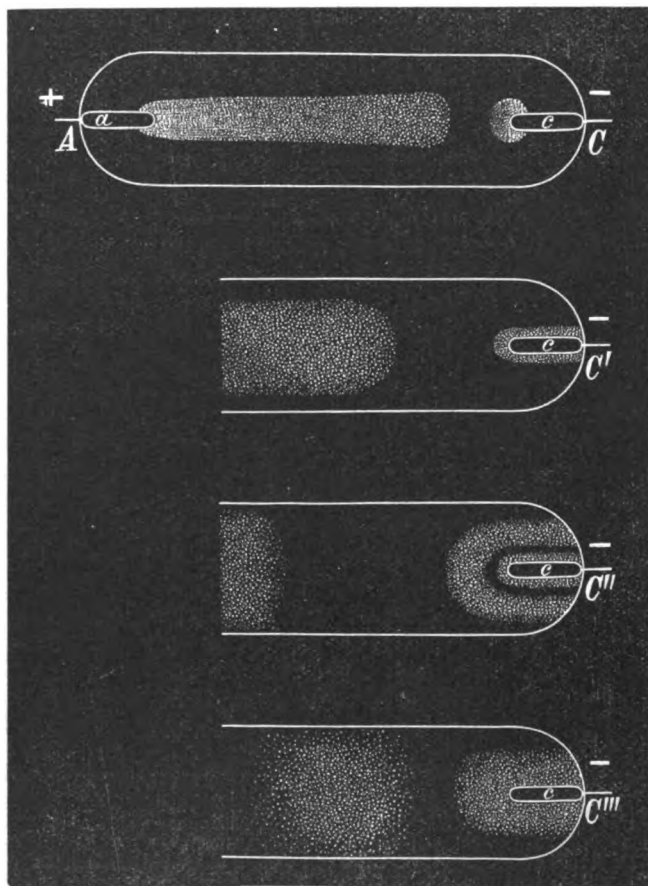
L'aspetto della scarica in vari gas varia, specialmente pel colore al variare del gas, e, per ogni gas, al variare della rarefazione. Riferiamoci alla variazione d'aspetto colla rarefazione di più in più forte a partire della pressione atmosferica.

Dapprima la scarica diviene meno rumorosa e meno splendente, ma più estesa, poi la luce si separa in due parti, di cui la parte positiva, quella attigua al polo positivo o anodo *a*, più estesa della parte attigua al catodo *c* (figura 348).

Fig. 348.

La luce positiva è nell'aria rossa o rosea mentre la negativa è violetta. In generale, per ciascuno dei vari gas che vengano attraversati dalla scarica, hanno colore fra loro diverso.

L'intervallo che le separa non è rigorosamente privo di luce, e si chiama *spazio oscuro di Faraday*.

Continuando nella rarefazione, le due luci impallidiscono e si allargano: ma presto la luce positiva si ritrae verso l'anodo a mano a mano che la rarefazione procede, mentre aumentano di estensione lo spazio oscuro e la luce negativa o *bagliore*. La luce positiva finisce collo sparire completamente ad una certa rarefazione.

Intanto il bagliore, si sarà più esteso sul catodo coprendolo non senza staccarsi da esso pur lasciandogli intorno una luminosità, detta *primo strato negativo*. Il bagliore si suole anche chiamare *secondo strato negativo*, mentre l'intervallo relativamente oscuro, che separa i due strati luminosi negativi, si chiama *spazio oscuro del catodo*.

Per una ulteriore rarefazione lo spazio oscuro del catodo si estende sino alle pareti del tubo, ed in questo non resta che una traccia di luminosità; mentre le pareti, che anche coi precedenti gradi di rarefazione

avevano cominciato a mostrarsi luminose per fluorescenza, appariscono vivamente illuminate. Dunque:

A bassissima pressione la scarica assume un carattere speciale che va attribuito ad una radiazione speciale, studiata per la prima volta dal fisico inglese Crookes, procedente in linea retta e normalmente al catodo, qualunque sia la posizione dell'anodo.

È tale radiazione, che, mentre determina una debole fluorescenza delle particelle costituenti il gas rarefatto contenuto nel tubo, consentendo così di seguire il suo corso, provoca una forte fluorescenza verde là dove colpisce il vetro. Siffatti raggi hanno ricevuto il nome di *catodici*, e risultano costituiti da particelle negative in movimento rapidissimo che sono gli *elettroni* già considerati (Fig. 349, 350, 352). Dal catodo verso l'anodo procede contemporaneamente una radiazione materiale, di particelle (ioni) cariche positivamente, costituenti i cosidetti *raggi positivi* o *canale*, che appariscono al di là del catodo se questo è forzato, e, naturalmente, in corrispondenza dei fori.

Fig. 349. - I raggi catodici colpiscono il tubo di vetro, rendendolo fluorescente, salvo in una regione *d* corrispondente direttamente all'ostacolo in forma di croce *b* che essi incontrano.

Fig. 350. - I raggi catodici partenti dal catodo concavo *a*, concentrati sull'estremità di una laminetta di platino *b* la arroventano.

Si rende ben visibile tragitto dei raggi catodici ricorrendo all'artificio di farli passare attraverso ad una fenditura e di farli rasentare un sottile strato di materiale che possa da essi venire illuminato per fluorescenza. I raggi catodici sono fortemente deviati da una calamita (Fig. 351) e da corpi fortemente elettrizzati, e presentano la rimarchevole proprietà (generale per gli elettroni dotati di forte velocità) di dare origine ad una radiazione speciale, della natura ondulatoria stessa della luce, quando colpiscono un qualche ostacolo materiale, come il vetro del tubo o altro.

§ 281. **Raggi X.** — Al di là difatti della regione di fluorescenza del vetro partono dal tubo questi nuovi raggi, che ebbero dapprima il nome di *raggi X* e che ora si chiamano, dal nome di chi prima li pose in evidenza, raggi del Röntgen. Essi hanno la proprietà di ionizzare rapi-

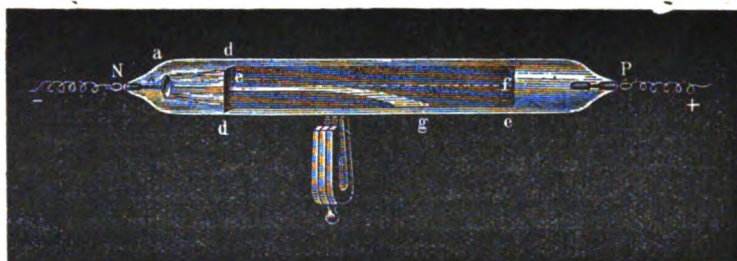



Fig. 351. - Deviazione magnetica dei raggi catodici.

damente i gas, di suscitare la fluorescenza varia di diversi corpi, di agire chimicamente su vari corpi, principalmente su quelli sensibili alla luce, di attraversare i corpi all'incirca secondo l'ordine decrescente di loro densità. Per queste tre ultime loro proprietà sono largamente utilizzati in chirurgia al fine di esplorare l'interno del corpo umano. Ciò col processo della radioscopia e con quello della radiografia. Per intenderlo, basta riferirsi alle figure 353 e 354 nelle

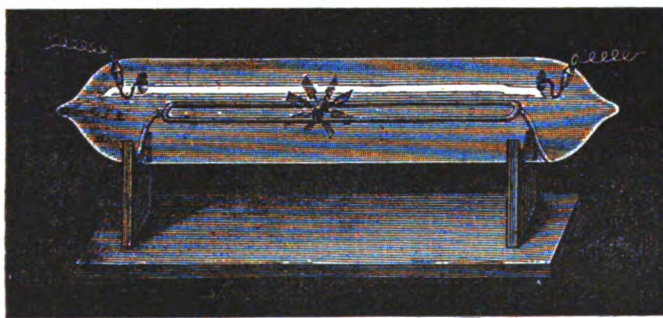



Fig. 352. - I raggi catodici mettono in moto un molinello.

quali è raffigurato un comune tubo produttore di raggi Röntgen, entro cui questi raggi si formano per urto dei raggi catodici provenienti dal catodo avente la forma di calotta sferica su uno specchietto inclinato, detto *anticatodo*, costituito da un metallo di alto peso atomico (platino, tungsteno) che li rivolge verso il basso ad agire, dopo aver attraversato più o meno il corpo (la mano ad es.) da esaminare, o su una lastra fotografica chiusa nello *chassis* e posta su di un tavolo, o su di uno schermo cosparso da materiale fluorescente e del quale si possa vedere la faccia posteriore.

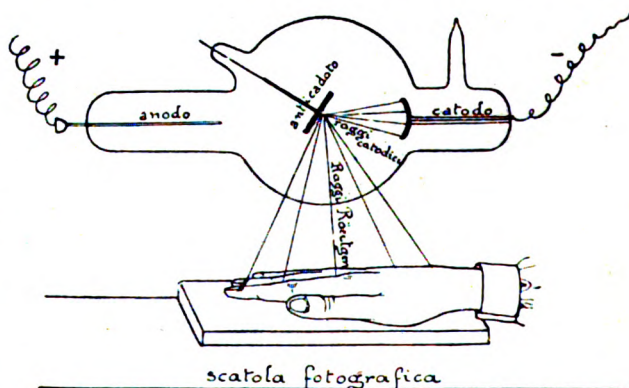



Fig. 353. - Come si procede per fare una radiografia.

Nel primo caso si ottiene sviluppando la lastra una impressione stabile (*radiografia* - Fig. 355). Nell'altro caso è possibile una osservazione immediata ma non duratura dell'interno del corpo (*radioscopia*).

Fig. 354. - Un tubo di Röntgen.

§ 282. **I raggi delle sostanze radioattive.** — Alcune *sostanze* dette *radioattive* emettono con continuità radiazioni del genere di quelle considerate nei precedenti paragrafi, costituite alcune da elettroni negativi (raggi β), altre da particelle cariche positivamente (raggi α) ed altre da raggi Röntgen (raggi γ). Ne segue che le sostanze radioattive per i raggi che emettono hanno in grado elevato il potere di ionizzare i gas. I raggi α hanno una carica doppia di quella dell'elettrone e sono formati da atomi di *elio*. Sono queste sostanze il *radio*, il *torio* e l'*attinio* anche nei loro sali e molti altri corpi ai primi legati nel modo come diremo. I primi corpi che rivelarono ad H. Becquerel il fatto furono *sali di uranio* per radio da essi contenuto, come dimostrò il Curie.

Fig. 355. - Una radiografia.

La *radioattività* è una proprietà della materia che essendo stata osservata su alcune sostanze solamente (corpi radioattivi), se non permette di affermare che sia proprietà generale della materia, non permette neppure di escluderlo *a priori*.

I corpi radioattivi sono vere sorgenti di energia il cui sviluppo si manifesta con effetti svariati (emissione di radiazioni, di calore, di luce, di elettricità), ed è essenzialmente legato all'atomo della sostanza, costituendo così un fenomeno *atomico*. Esso è di più *spontaneo*.

Oltre ai raggi principali indicati apparisce in certi casi la emissione di raggi detti δ, costituiti da elettroni di debole velocità, che non impressionano le lastre fotografiche e non ionizzano i gas.

I vari raggi sopra ricordati producono oltre agli effetti indicati, effetti chimici, dei quali il più importante è la decomposizione dell'acqua ed effetti fisiologici come l'azione sull'epidermide e su altri tessuti utilizzata in terapia.

Le sostanze radioattive, pei raggi che emettono, hanno la facoltà di impressionare le lastre sensibili e di eccitare la fluorescenza di molti corpi.

Un determinato corpo radioattivo emettendo la propria radiazione si trasformerebbe in un altro che emettendo raggi diventerebbe un altro corpo e così via, per modo che i vari corpi successivi corrisponderebbero a varie generazioni di una medesima famiglia.

Nella qui unita tabella indichiamo i successivi elementi delle tre famiglie radioattive sinora considerate, quella dello *uranio-radio*, quella dell'*attinio* e quella del *torio*.

Si è notato che nei processi di successiva disintegrazione si ha talvolta una biforcazione con arresto della trasformazione in uno dei lati di questa. Nella tabella si è segnato con spostamento a destra quello dei due prodotti che non procede ad ulteriori disintegrazioni.

Nella terza colonna della tabella si è omessa l'indicazione della radiazione γ giacchè sembra che la diano tutti gli elementi radiottivi. L'esperienza però lo ha provato in modo sicuro soltanto per tutti i corpi che emettono raggi β e per alcuni solamente di quelli che emettono i soli raggi α.

SOSTANZE	T	Raggiamento
Uranio 1	5,0 . 10^9 anni	α
Uranio Y	1,5 giorni	β
Uranio X_1	24,6 giorni	β
Uranio X_2	1,15 minuti	β
Uranio 2	2,10^6 anni?	α
Ionio	2,10^5 anni?	α
Radio	1730 anni	α, β
Emanazione di Ra	3,85 giorni	α
Radio A	3,0 minuti	α
Radio B	26,7 minuti	β
Radio C_1 } Radio C	19,5 minuti	α?, β
Radio C_2 } Radio C	1,4 minuti	β
Radio C^1 } Radio C	10^{-6} sec.?	α
Radio D	16,5 anni	β
Radio E	5,0 giorni	β
Radio F (= polonio)	136 giorni	α
Attinio	....	....
Radioattinio	19,5 giorni	α, β
Attinio X	11,4 giorni	α
Emanazione di attinio	3,9 sec.	α
Attinio A	0,002 sec.	α
Attinio B	36,1 minuti	β
Attinio C	2,15 minuti	α
Attinio D	4,71 minuti	β
Torio	1,8 . 10^{10} a.	α
Mesotorio 1	5,5 anni	....
Mesotorio 2	6,2 ore	β
Radiotorio	2,02 anni	α
Torio X	3,64 giorni	α
Emanazione di torio	54 sec.	α
Torio A	0,14 sec.	α
Torio B	10,6 ore	β
Torio C_1	60 minuti	α, β?
Torio D	3,1 minuti	β
Torio C_2	10^{-11} sec.?	α
Potassio	....	β
Rubidio	....	β

Accurate osservazioni hanno messo in rilievo che anche il potassio ed il rubidio emettono spontaneamente raggi β. La cosa è registrata nella tabella.

Secondo la indicata teoria delle successive trasformazioni, ogni sostanza radioattiva subisce nel corso del tempo una distruzione progressiva più o meno rapida. Una sostanza radioattiva chimicamente semplice si distrugge per tal modo che la *velocità di distruzione* sia proporzionale alla quantità presente; per conseguenza questa quantità decresce

secondo una legge semplice, caratterizzata da un coefficiente invariabile che dipende dalla natura della sostanza e può servire a definirla.

Le principali costanti, oltre alla indicata, che si considerano per le sostanze radioattive sono:

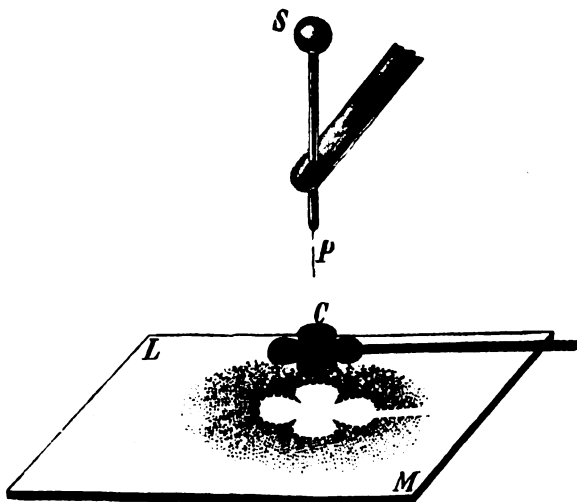
1. Il *periodo di disattivazione* T indicante il tempo che deve passare perchè l'*attività* o la *capacità di ionizzare*, si riduca alla metà del valore iniziale.

2. La *vita media* della sostanza cioè il tempo necessario per distruggere un qualsiasi numero N di suoi atomi. La si ottiene moltiplicando T per 1,4427.

§ 283. **Le ombre elettriche del Righi.** — Il fenomeno della radiazione catodica presenta una forte analogia con quello delle ombre elettriche, messo in rilievo dal Righi. All'epoca nella quale il Crookes eseguiva le sue esperienze, il Righi si avvicinava alla spiegazione che poi ne venne data ritenendo che i raggi catodici fossero molecole gassose elettrizzate dal catodo e da esse respinte e pensò che una punta elettrizzata dovesse produrre nell'aria alla pressione ordinaria un effetto analogo per opera delle molecole elettrizzate dalla punta e respinte. Unica differenza doveva esistere in ciò che

Fig. 356.

per quest'ultimo caso, in causa delle loro frequenti collisioni con quelle dell'aria ambiente, le molecole elettrizzate avrebbero conservato una velocità sempre assai piccola e si sarebbero mosse sensibilmente secondo le linee di forza, anzichè secondo linee rette, come accadeva nel gas estremamente rarefatto.

Eseguì quindi esperienze varie delle quali tipica è la seguente (Fig. 356). Una punta metallica rivolta in basso è fissata all'estremità inferiore di un conduttore isolato e terminante superiormente in una piccola sfera. Al disotto è posta una piccola croce di ebanite parallela ad una lastra metallica collocata più in basso, e sulla quale sta una lastra di ebanite recante sulla faccia inferiore un'armatura di stagnola. Accostando alla sfera S un conduttore carico negativamente cosicchè si abbia tra esso e la sfera una sola scarica lunga circa 1 cm., si ha dalla punta il flusso di particelle cariche le quali procedono sino alla lastra d'ebanite, tranne che in corrispondenza della croce di ebanite che le trattiene. Basti difatti proiettare subito sulla lastra inferiore di ebanite il solito miscuglio di polveri elettroscopiche perchè si manifesti l'ombra della

croce in campo rosso. Quest'ombra non è soltanto priva di minio; è anche coperta di zolfo, il quale però vi rimane per l'attrazione dovuta alla carica positiva formatasi per influenza nell'armatura di stagnola.

Ombre simili il Righi ottiene collocando sulla lastra metallica, invece della lastra di ebanite, un foglio di carta sul quale sia stata deposta uniformemente della finissima polvere metallica. Respinta dalla carica positiva della lastra (destata per influenza dalla negativa per qualche tempo comunicata alla punta con una macchina elettrica), la polvere sfuggirebbe interamente dal foglio di carta, se in corrispondenza della regione interamente libera per il moto della elettricità negativa dalla punta, non venisse da tale elettricità negativa neutralizzata, così da ricadere poi sul foglio tutto intorno alla regione d'ombra della croce. In tale regione il foglio di carta rimane nudo perchè corrispondentemente ad essa non può giungere la elettricità negativa neutralizzatrice.

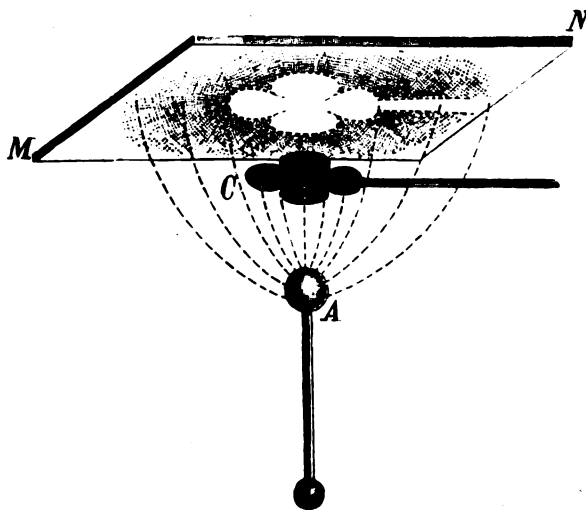



Fig. 357.

Si può avere una imitazione delle descritte esperienze sulle ombre elettriche facendo muovere, per opera delle forze elettriche dei granelli di polvere. Basta ricorrere alla disposizione rappresentata dalla Fig. 357 e dovuta al Righi. Sul conduttore *A* si colloca della polvere nera di ferro porfirizzato e si ricopre di gomma liquida un foglio di carta aderente alla faccia inferiore della lastra metallica *MN*.

Toccando il sistema metallico *A* con un conduttore carico, la carta si annerisce in corrispondenza delle regioni non protette dalla croce di ebanite *C*. Illuminando intensamente la regione interposta tra la pallina e la lastra, può vedersi ben netto l'andamento delle traiettorie curvilinee seguite rapidamente dai granelli di polvere respinti dalla pallina ed attratti dalla lastra.

§ 284. **Effetti fisiologici della scarica.** — Se l'elettricità attraversa il corpo umano (in generale il corpo di un animale) può in determinate condizioni produrre effetti fisiologici considerevoli, che talvolta possono provocare anche la morte. Commisurati opportunamente si applicano in terapia.

CAPITOLO XXIX.

I CONDENSATORI.

§ 285. **Che cosa è un condensatore.** — Sia un corpo conduttore A (Fig. 358) e carichiamolo totalmente di elettricità, per esempio, positiva. Questa, si distribuirà in A secondo le esigenze della curvatura delle sue varie parti. Avviciniamogli un altro corpo conduttore B, isolato ed avente esso pure forma di disco. Questo corpo si caricherà per influenza di elettricità negativa nella regione vicina ad A, e di elettricità positiva nella regione più lontana. Come per l'influenza del genere, si può ritenere che l'elettricità di A separi le cariche negativa e positiva neutralizzantisi in B, attraendo la negativa e respingendo la positiva. Ma si tratta di una azione reciproca nel senso che la negativa B attrae la elettricità di A, come la positiva di B la respinge. Senonchè questa repulsione è più leggera della attrazione, in quanto le due cariche che agiscono sono più lontane. L'effetto risultante è quello di un'attrazione che porta la carica distribuita in A ad addensarsi nella parte affacciata verso B, in guisa da lasciare, diciamo così, posto per nuova elettricità in A. Più posto ci sarà quanto più intensa sarà l'attrazione considerata, cioè quanto più piccola sarà la distanza fra A e B. Ma si può fare in modo che in B si distribuisca la sola elettricità negativa suscitata per influenza mettendo B in comunicazione col suolo. Difatti, allora il corpo influenzato da A viene costituito dal corpo B, dal collegamento di B col suolo e dal globo terrestre. L'elettricità dello stesso nome di quella di A suscitata per influenza andrà allora a portarsi a grande distanza sul globo, e ad agire vicendevolmente rimangono soltanto la positiva di A e la negativa di B, attraenti per tal modo senza contrasto. In questa nuova condizione di cose, mantenendo cioè B in comunicazione col suolo, si renderà molto maggiore di prima l'addensamento dell'elettricità di A nella parte di questo rivolta verso B e conseguentemente si accrescerà la possibilità di porre nuova elettricità in A.

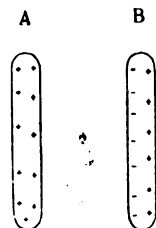



Fig. 358.

Meglio dell'aria operano fra A e B altri corpi isolanti, detti *dielettrici*, come lo zolfo, l'ebanite, il vetro nel senso che l'azione di addensamento, già considerata per la elettricità di A in conseguenza della mutua attrazione fra questa e quella di B sarà più forte se all'aria interposta fra A e B si sostituisce, ad esempio, del vetro, od una lastra di ebanite, come è quella rappresentata dalla Fig. 360 in C. Per avere bene efficace l'azione di addensamento si stringeranno insieme le tre parti ACB della figura. Possiamo in poche parole raccogliere tutto ciò che abbiamo sin qui detto nel modo seguente:

Un conduttore carico, che non possa più contenere elettricità, acquista possibilità di accoglierne ancora se gli si avvicina un altro corpo conduttore, tanto più quanto più questo gli sia vicino, tanto più se il secondo corpo conduttore sia posto in comunicazione col suolo, tanto più ancora se fra l'un corpo e l'altro si ponga in posto dell'aria del vetro o dell'ebanite.

Più precisamente si potrebbe dire, in armonia colla definizione

data di capacità, che coll'avvicinare ad un conduttore un altro corpo pure conduttore si eleva la *capacità elettrica* del primo. Tale capacità si eleva ancora se il secondo conduttore si pone in comunicazione col suolo e tanto più si eleva quanto più vicino si ponga il secondo conduttore al primo. La si può elevare anche scegliendo opportunamente il corpo isolante da interporre fra i due conduttori (Fig. 359 e 360).

Ecco una maniera per accogliere in un conduttore una grande quantità di elettricità, per condensare dell'elettricità in un conduttore che di per sè ne potrebbe contener poca.

Si chiama perciò *condensatore* un sistema di due conduttori vicini l'uno all'altro, separati da un isolante, e tali che uno di essi possa, se si vuole, mettersi in comunicazione col suolo mentre l'altro si mette in comunicazione con una sorgente di elettricità. I due conduttori si chiamano *armature* del condensatore e l'isolante *dielettrico* o *coibente*.

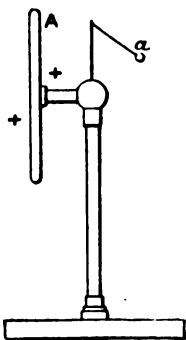



Fig. 359. - Il potenziale elettrico di *A* si può ritener misurato in modo relativo dalla deviazione del pendolino *a* ad esso connesso e isolato insieme ad *A* mediante una colonna isolante.

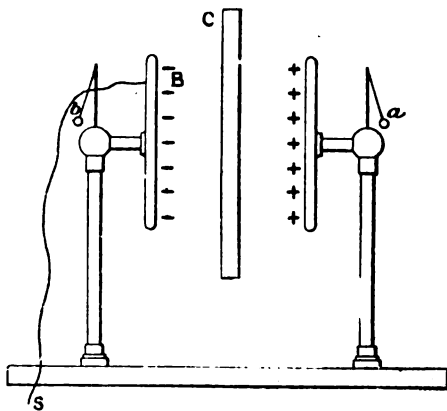



Fig. 360. - Poichè il potenziale di un conduttore varia in ragione inversa della capacità di questo, la deviazione del pendolino *a* può indicarci le vicende della capacità del conduttore cui esso è connesso coll'avvicinare *B*, col porre questo in comunicazione col suolo e coll'interporre la lastra isolante.

I condensatori sono molto utili giacchè essi sostituiscono con economia e comodità dei semplici conduttori, i quali, per avere la stessa loro capacità, dovrebbero possedere grandissime dimensioni difficili da realizzare. Essi permettono di fare intervenire nelle esperienze delle forti quantità di elettricità.

È bene ora dire che la *costante dielettrica* già citata altra volta come caratteristica, sotto il punto di vista dei fenomeni elettrici, di un determinato isolante è misurata dal rapporto fra la capacità di un condensatore qualsiasi che abbia per dielettrico quell'isolante e quella di un identico condensatore che abbia il vuoto, o, praticamente, l'aria al posto di quel dielettrico. Il vetro e la mica sono fra i solidi i corpi a più elevata costante dielettrica. Per il vetro essa ha valori compresi fra 3 ed 11 e per la mica fra 4,6 e 10.

Si dimostra facilmente che la capacità C di un condensatore è proporzionale alla superficie S di ciascuna delle armature, ed in ragione inversa della mutua loro distanza d, in ragione diretta della costante dielettrica k del coibente. Il calcolo dà anzi la formola:

$$C = \frac{kS}{4\pi d}. \qquad (78)$$

§ 286. **La bottiglia di Leida.** — I più usuali condensatori sono le cosidette bottiglie di Leida. Si riducono a recipienti di vetro rivestiti esternamente ed internamente con foglia di stagnola sino a due terzi circa della loro altezza. Il collo ha un tappo reso ben isolante alla superficie con ceralacca o con gommalacca, ed attraversato da un conduttore di ottone che tocca l'armatura interna e termina all'esterno con una sfera. Talune bottiglie invece di un rivestimento interno di stagnola contengono, sino ad una certa altezza, degli stracci di stagnola (Fig. 361). Altre bottiglie invece sono veri e propri vasi privi di collo; in essi la stagnola interna si prolunga metallicamente con un conduttore terminato in basso a molla ben adattabile dentro al vaso. La stagnola esterna e quella interna costituiscono le due armature.

Per scopi d'insegnamento si costruiscono anche bottiglie di Leida ad armature mobili, come quella della Fig. 360 (detta condensatore di Epino) o come quella della Fig. 362.

Fig. 361.

Fig. 362. - Una bottiglia di Leida scomponibile come mostra la Fig. 363.

§ 287. **Le batterie e le cascate.** — Per condensare una maggiore quantità di elettricità si formano delle *batterie* (Fig. 366) mettendo fra loro in comunicazione, mediante un rivestimento metallico interno di una cassetta di legno, le stagnole esterne

Fig. 363.

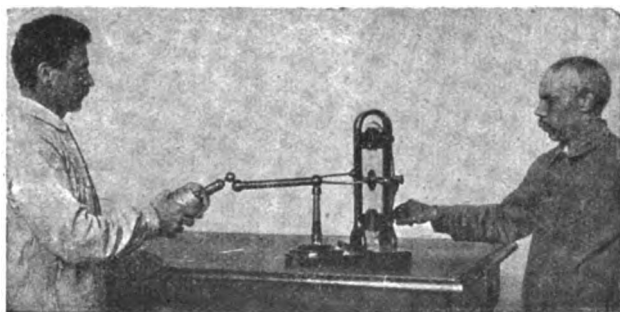



Fig. 364. - Come si carica una bottiglia di Leida.

di più bottiglie e collegando fra di loro mediante conduttori metallici le armature interne. Più condensatori riuniti in batteria formano l'equivalente d'un unico condensatore di capacità uguale alla somma delle capacità dei condensatori collegati. Si ottiene invece una capacità minore di quella d'un unico condensatore, se tutti vengono riuniti in *serie* od in *cascata*, cioè per modo che una armatura di uno comunichi con una del successivo, l'armatura libera di questo con una di un altro, e così via. Questa disposizione è utile quando occorra raggiungere potenziali assai elevati. Se i condensatori costituenti una cascata sono tutti uguali fra di loro, la capacità della cascata è uguale alla capacità di uno dei singoli condensatori divisa per il numero di questi.

§ 288. **Carica di un condensatore.** — Dopo quello che si è detto è facile intendere che per caricare una bottiglia di Leida od un condensatore qualsiasi, si opera come mostra la Fig. 364. Si terrà la bottiglia direttamente in mano mediante la sua armatura esterna, così da metter questa in comunicazione col suolo, mentre il conduttore che esce dalla bottiglia e che comunica coll'armatura interna di questa si pone in comunicazione con una sorgente di elettricità quale è il conduttore di una macchina elettrica in azione.

Fig. 365. - Come si scarica una bottiglia di Leida coll'arco scaricatore.

§ 289. **Scarica di un condensatore.** — Per scaricare una bottiglia od una batteria che si riduce essa pure ad un condensatore, bisogna che il corpo od il sistema di corpi attraverso ai quali deve passare la scarica facciano ponte di comunicazione fra le due armature (Fig. 366). Se è una persona che desidera essere attraversata dalla scarica toccherà simultaneamente con le due mani le due armature. Se si desidera scaricare il condensatore senza utilizzare la scarica, si usa, come mostra la Fig. 365, soltanto l'*arco scaricatore,* che è un sistema di due archi metallici collegati per un estremo con una cerniera, e muniti di manichi isolanti. Si pone a contatto l'armatura esterna con uno degli archi, mentre l'altro va a portarsi in prossimità dell'asta metallica comunicante coll'armatura interna. Prima di raggiungere il contatto scocca fra l'arco e l'asta metallica una scintilla.

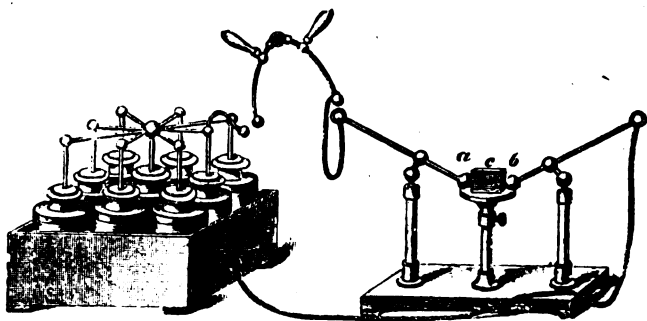



Fig. 366. - La batteria rappresentata a sinistra è disposta per farne passare la scarica attraverso al filo metallico sottile *ab* adattato contro al rettangolo c.

§ 290. **I dielettrici.** — Per molto tempo si credette, che i fenomeni elettrici avessero sede nei conduttori, e che ai corpi dielettrici non spettasse che la parte di isolatori.

Si riconobbe però che la quantità d'elettricità prodotta per influenza dipende dalla natura del mezzo isolante, che circonda i conduttori, tanto che se all'aria, che sta fra le armature d'un condensatore, si sostituisce, come abbiamo visto, un altro coibente, la capacità del condensatore muta, il che viene espresso dicendo che muta la *costante dielettrica* del coibente.

Altri fatti vennero di poi a mettere in rilievo che i dielettrici non sono indifferenti nei fenomeni elettrici, finchè il fisico inglese Faraday espresse la opinione che nei dielettrici e non nei conduttori i fenomeni elettrici avessero la loro sede. Le idee di lui però accolte sulle prime poco benevolmente, vennero generalmente accettate solamente dopo che il Maxwell dette loro una forma conveniente.

Secondo il concetto Faraday-Maxwell la sede principale dei fenomeni sarebbe stata (come già dicemmo nel § 285) fuori dei conduttori, e siccome la esperienza aveva provato che i fenomeni stessi avvengono anche se i conduttori sieno circondati da uno spazio privo di materia ed occupati solo dall'etere cosmico, i fenomeni elettrici avrebbero avuto la sede nell'etere libero o in quello contenuto nei dielettrici.

Da idee che ammettevano attivi i soli conduttori si passò all'eccesso opposto che ammetteva attivi i soli dielettrici.

Ora si pensa che sieno gli uni e gli altri, cogli uffici loro rispettivi. Il dielettrico circostante ad un conduttore carico sarebbe in una condizione paragonabile ad una deformazione elastica corrispondente ad una tensione lungo le linee di forza e ad una distensione lungo le superficie di livello.

CAPITOLO XXX.

LA CORRENTE E LA PILA.

§ 291. **La corrente elettrica.** — Quando da un corpo A va ad un corpo B elettricità attraverso ad un corpo conduttore C si dice che questo conduttore è sede di una *corrente elettrica,* la quale può durare più o meno a lungo a seconda della natura e delle condizioni del conduttore C e dei corpi A e B. Le correnti però che ordinariamente si considerano corrispondono come vedremo ad un processo continuato di carattere circolatorio lungo una strada chiusa, detta *circuito.*

Fig. 367. - Rana preparata alla Galvani e contrazione da essa provata.

Come l'elettricità in equilibrio su di un corpo può dare origine a numerosi fenomeni interessanti, la elettricità in movimento, che costituisce una corrente elettrica, può esser causa di effetti svariatissimi, di alcuni dei quali avemmo occasione già di occuparci; importanti e capaci di applicazione, sia entro il conduttore stesso che è sede della corrente, sia fuori di esso.

§ 292. **L'esperienza del Galvani.** — Chi additò prima il fenomeno della corrente, e dette coll'invenzione della *pila* un metodo sicuro per produrla con una certa continuità da congegni eminentemente sem-

plici, fu un grande italiano, Alessandro Volta, che andava in cerca della spiegazione da darsi ad un fatto messo in rilievo da un altro italiano, Luigi Galvani, altamente meritevole per avere di questo fatto subito intuita la grande importanza.

Luigi Galvani, professore all'Università di Bologna, aveva notato (1791) che collegando mediante un arco metallico i nervi lombari coi muscoli di una coscia di una rana, anche divisa a metà, se di recente scuoiata, si aveva una violenta contrazione dell'animale (Fig. 367).

Ad elettricità contenuta nella rana, che poi in seguito si dimostrò bene esistere in certi pesci ed in molti animali se non in tutti, attribuì subito il Galvani il fatto osservato.

Alessandro Volta, in seguito alla constatazione che il fatto osservato si manifestava più spiccatamente quando l'arco metallico di comunicazione fosse costituito da due metalli differenti come rame e zinco, pensò che il fenomeno si dovesse ad una differenza di potenziale che in ogni caso sorgerebbe dal semplice contatto fra due metalli. Il *contatto* dei due metalli dell'arco originerebbe una differenza di potenziale capace di lanciare elettricità attraverso all'animale determinandone le contrazioni. Fu poi condotto ad ammettere il Volta che anche fra due liquidi conduttori e fra un metallo ed un liquido nascessero per contatto differenze di potenziale, ma molto esigue e quindi trascurabili rispetto a quelle determinate dal contatto di due metalli. Distinse perciò i conduttori in *conduttori di prima classe* (metalli) ed in *conduttori di seconda classe* (liquidi) asserendo che quando in una coppia si fosse trovato uno di questi ultimi la differenza di potenziale della coppia potesse trascurarsi.

Fig. 368.

I risultati delle esperienze in proposito istituite (Fig. 369), si possono riassumere nella seguente legge:

Esiste al contatto di due metalli, e, più generalmente, al contatto di due corpi differenti, una differenza di potenziale che dipende dalla natura dei corpi e dalla loro temperatura, ma che è del tutto indipendente dalle loro dimensioni, dal loro stato di elettrizzazione e dall'estensione delle superfici in contatto.

Altra legge importante delle *forze elettromotrici di contatto* è la seguente: *in una catena chiusa formata da metalli differenti in contatto successivo, se la temperatura è uniforme, non si ha movimento di elettricità* (Fig. 368 *B*). Da essa risulta che *la differenza di potenziale esistente fra due metalli* **a** *e* **e** *riuniti da una serie di altri metalli alla medesima temperatura è la medesima che avrebbero i metalli stessi* **a** *e* **e** *messi a diretto contatto* (Fig. 368 *A*). La qual cosa fa concludere che *il potenziale ha lo stesso valore agli estremi di una catena aperta di metalli terminata da conduttori della medesima natura.*

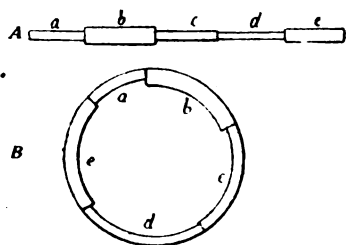
§ 293. **La classica pila del Volta.** — Secondo l'ipotesi del Volta si potevano moltiplicare gli effetti della forza elettromotrice di contatto sovrapponendo nello stesso ordine parecchi doppi dischi in rame e zinco, ma avendo cura di evitare forze elettromotrici antagoniste

nei contatti dei doppi dischi sopprimendo il loro contatto diretto col frapporre fra di essi un conduttore di seconda classe (acqua salata od acidulata). In base a questo concetto il Volta realizzò (1799-1800) la classica sua *pila* (Fig. 370) o *colonna* di doppi dischi. Ebbe per tal modo produzione di una

Fig. 369.

Fig. 369. - Elettroscopio condensatore del Volta. È un comune elettroscopio a foglie che ha in luogo della sferetta esterna un disco di metallo sul quale può porsi un disco uguale verniciato con vernice isolante nella faccia inferiore e munito di manico isolante. In virtù della maggiore capacità del sistema si può maggiormente caricarlo col tenere durante la carica data al disco inferiore, in comunicazione col suolo, il disco superiore. Allontanando dopo la carica il disco superiore, per la diminuita capacità, il potenziale si accresce e le foglie che prima non divergevano, divergono. Il Volta se ne servì per eseguire le classiche esperienze dimostrative della elettricità di contatto. Caricava in una *prima esperienza* col rame di una doppia lamina di rame e zinco mentre teneva lo zinco per mano e quindi in comunicazione col suolo. Notava una deviazione delle foglie perchè il rame essendo elettricamente della stessa natura dell'ottone costituente l'apparecchio si aveva la sola differenza di potenziale di contatto fra il rame e lo zinco della doppia lamina.

Caricava in una *seconda esperienza* collo zinco mentre il rame era tenuto in comunicazione col suolo e non notava deviazione nell'elettroscopio perchè alla differenza di potenziale del contatto nella doppia lamina si associava la differenza opposta di potenziale dovuta al contatto fra zinco e ottone dell'apparecchio.

Sopprimeva o riduceva in una *terza esperienza* questa ultima differenza di potenziale di contatto col sostenere fra lo zinco e l'elettroscopio un dischetto di panno imbevuto con acqua salata od acidulata e corrispondentemente aveva la deviazione nell'elettroscopio.

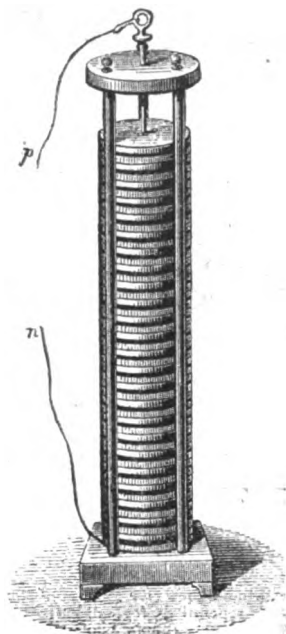



Fig. 370. - La prima pila di Volta a doppi dischi di rame e zinco.

corrente elettrica in un filo congiungente gli estremi o *poli*. Il rame estremo assume potenziale positivo e lo zinco potenziale negativo (Fig. 370).

La teoria del contatto si *ritenne* (§ 294) così dimostrata; ed a questa *pretesa* dimostrazione concorse la esecuzione per parte del Volta delle altre memorabili esperienze (Fig. 369) alle quali già si accennò. Sorse però presto la opinione che il funzionamento della pila non si dovesse (§ 294) nel contatto fra i metalli delle coppie come pensava il Volta ma all'azione chimica del liquido sui metalli. Fu il francese Gauthêrot, che applicò al caso della pila l'idea dell'intervento di una azione chimica (fra metalli e liquidi dell'organismo) nella esperienza stessa del Galvani, manifestata dal chimico italiano Giovanni Valentino Fabbroni.

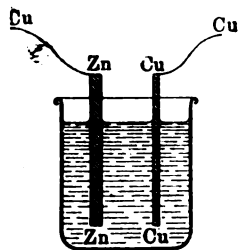



Fig. 371.

La questione non è ancora risolta e sul conto del funzionamento della pila si è ancora nel campo delle ipotesi. Sembra probabile che la parte principale sia esercitata da effetti più o meno complessi dovuti al contatto, ma più specialmente al contatto fra i metalli ed il liquido circostante ad essi.

La forma primitiva data dal Volta alla sua pila presentava inconvenienti, epperò egli la modificò. La modificazione più semplice è la cosidetta *pila a corona di tazze*, e costituita (Fig. 372) da una successione di recipienti contenenti acqua acidulata e ciascuno

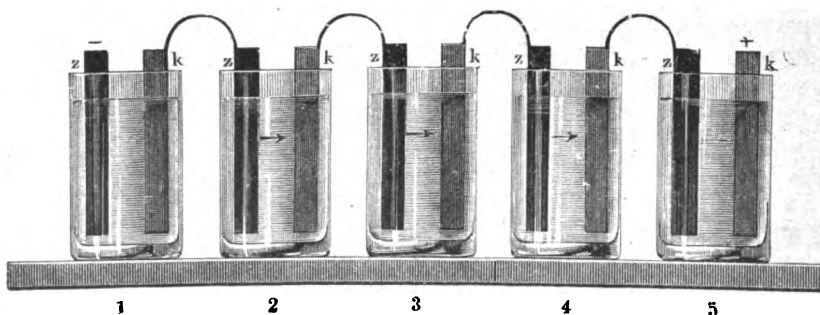



Fig. 372. - Pila a corona di tazze.

una lastra di rame ed una lastra di zinco amalgamato. Lo zinco di un recipiente è collegato al rame del successivo e così via, per modo che agli estremi della successione di recipienti è libera in uno di questi una lastra di zinco e nell'altro una lastra di rame. Gli estremi di queste lastre libere costituiscono i cosidetti poli della pila, positivo il rame, negativo lo zinco. Basta congiungere i poli mediante un filo metallico perchè questo diventi sede di una corrente elettrica, che sin da ora, unicamente *per convenzione*, riterremo procedere attraverso il filo nel senso che va dal rame allo zinco, dal polo positivo cioè al negativo.

Fig. 373. - Pila secca dello Zamboni. Questa pila è costituita da coppie formate con sottili doppi dischi di rame e di zinco separati da fogli di carta convenienti. Trattenute in pacchetto queste coppie danno agli estremi della pila una differenza di potenziale discretamente elevato. Si usano adesso pile di questo genere formate con dischi di carta metallizzata alla superficie.

Ogni recipiente coll'acqua acidulata e colle lastre metalliche è un *elemento* della pila e si chiama anche *coppia* sebbene entrino a costituirla tre corpi; i due metalli ed il liquido. La pila più semplice sarà quindi costituita da una sola coppia (Fig. 371), nella quale, secondo l'uso, lo zinco si rappresenta con *Zn* ed il rame con *Cu*.

Le coppie possono collegarsi fra loro come si vide nella pila a corona di tazze e come vien rappresentato schematicamente dalla Fig. 374 oppure collegando insieme tutti i poli positivi delle coppie ed insieme tutti i poli negativi (Fig. 375). Col primo collegamento che è detto *in serie*, si sommano agli estremi le differenze di potenziale delle varie coppie. Con l'altro, detto *in superficie* od *in quantità*, la differenza di potenziale del sistema rimane quella di ciascuna coppia, salvo che la pila lancia (a parità di tutte le altre condizioni) nel circuito esterno una

+ −

Fig. 374. - Più coppie collegate in serie.

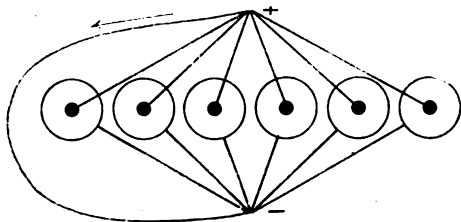



Fig. 375. - Più coppie collegate in quantità.

maggiore quantità di elettricità. Si costruiscono anche delle *pile* dette *a secco* di cui la Fig. 373 mostra un esemplare.

§ 294. **La polarizzazione.** — Congiungendo i poli di una pila agli elettrodi di un voltametro contenente un elettrolita come acqua acidulata, col passaggio della corrente in questo e col conseguente deporsi di ioni agli elettrodi, nasce in questi una differenza di potenziale opposta a quella dei poli della pila che va gradatamente accrescendosi sino ad attenuare in modo sensibile ed anche ad annullare la corrente fornita dalla pila. Si dice che gli elettrodi del voltametro si *polarizzano*. Orbene, una coppia a circuito chiuso va soggetta, per parte della corrente che essa stessa genera e dei ioni contenuti nel liquido della pila medesima, alla polarizzazione come un voltametro. Basta però tenere presente che il metallo che all'esterno è polo positivo o negativo, all'interno è elettrodo negativo o positivo rispettivamente. Ne segue che le pile del Volta più sopra descritte dopo breve tempo che sieno chiuse in circuito si affievoliscono cioè non danno più corrente sensibile. Ciò fu constatato praticamente, tanto che si pensò da tempo a modificazioni opportune. Le figure 376 a 381 rappresentano alcune pile così dette *impolarizzabili*, o, meglio, a *depolarizzante* perchè contengono materiali atti a ridurre fortemente la polarizzazione.

Queste modificazioni mirano tutte ad evitare che i ioni, in certo senso nocivi, si depositino sui metalli della pila e per gran parte si possono ricondurre facilmente al tipo della pila di Volta. Riferiamoci per esempio alla pila Daniell costituita come è indicato nella Fig. 376. In fondo si tratta di una guaina di soluzione di solfato di rame, data, mediante un vaso poroso, al rame di una coppia voltaica. E tale guaina agisce in modo che i ioni idrogeno non raggiungono il rame. I ioni positivi pros-

Pile a depolarizzante.

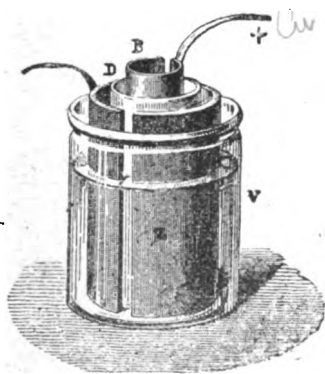



Fig. 376. - Pila di Daniell - *V*, vaso di vetro contenente acqua acidulata con acido solforico; *Z*, lamina di zinco piegata in cilindro, la quale è immersa nell'acqua acidulata e munita d'un filo di rame che costituisce il polo negativo della pila; *D*, vaso poroso aperto superiormente, che contiene una soluzione di solfato di rame e trovasi nell'interno dello zinco; *B*, lamina di rame piegata in cilindro la quale sta nel centro ed è munita di un filo di rame costituente il polo positivo.

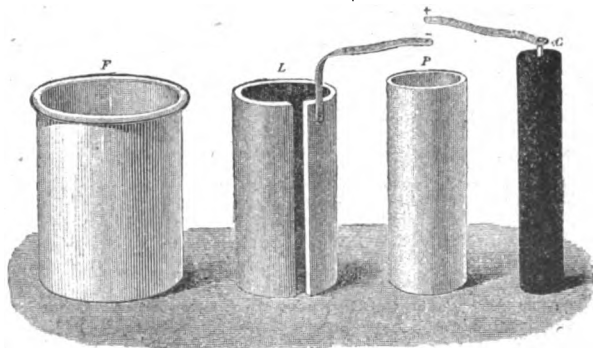



Fig. 377. - Le parti solide di un elemento Bunsen:

F - Recipiente esterno nel quale si pone una soluzione acquosa di acido solforico.

L - Lastra di zinco amalgamata piegata a superficie cilindrica: costituisce il polo negativo.

P - Vaso poroso, formato cioè con porcellana non verniciata, entro cui si pone acido nitrico.

C - Cilindro di carbone di storta costituente il polo positivo. Se al posto del carbone si pone rame ed in luogo di acido nitrico una soluzione di solfato di rame, invece dell'elemento Bunsen si ha l'elemento Daniell già descritto.

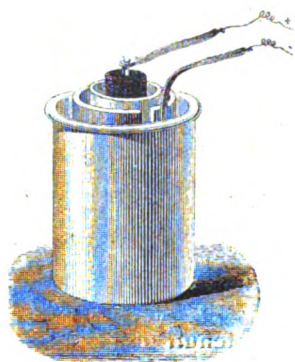



Fig. 378. - La pila Bunsen o meglio, l'elemento Bunsen.

Fig. 379. - Il carbone e lo zinco dell'elemento Grenet. Lo zinco può alzarsi ed abbassarsi. Lo si ferma con una vite di pressione.

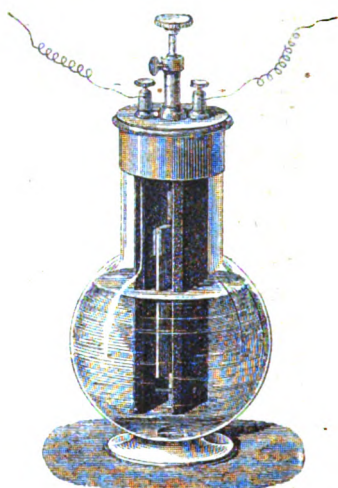



Fig. 380. - Un elemento Grenet a bicromato potassico. Il polo positivo è dato da due lastre fra loro comunicanti di carbone di storta immerse in una soluzione acida di bicromato potassico. Il polo negativo che adduce all'attacco di sinistra è dato dall'estremo di una lastra di zinco amalgamata.

Fig. 382. - Pila campione Daniell-Fleming. Si compone di un tubo di vetro ad *U* munito di due tubi laterali continuantisi in serbatoi con rubinetti *R* ed *R'*, nella parte superiore delle sue branche; di un tubo con rubinetto *R''* nella parte incurvata; e di un tubo laterale con rubinetto *R'''* nella regione mediana di una delle branche. Contiene una conveniente soluzione (che si fa scendere da *A*) di solfato di zinco sino in *N*; ed una conveniente soluzione (che si fa scendere da *A'*) di solfato di rame pure sino in *N*; e ciò in virtù delle differenti densità delle soluzioni. Nella prima lungo il ramo sinistro del tubo ad *U* è immerso un cilindro di zinco, che fa da polo negativo, e nella seconda lungo il ramo destro del tubo è immerso un cilindro di rame che fa da polo positivo. Colle densità rispettive 1,4 ed 1,2 per le due soluzioni, la f. e. m. a 15° è di circa 1,072.

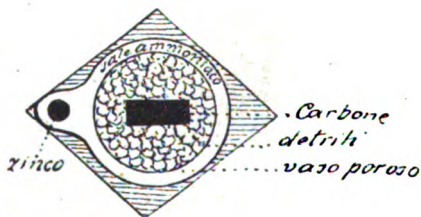
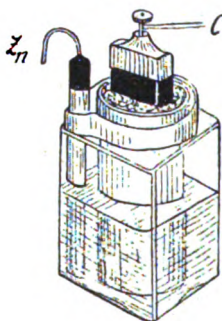



Fig. 381. - Elemento Leclanché, con soluzione di sale ammoniaco e detriti di carbone misti a biossido di manganese.

simi al rame, che su di questo si depositano naturalmente non alterandolo, sono i ioni positivi *Cu* del solfato di rame.

Il fatto che nell'interno di una pila si verificano gli stessi fenomeni elettrolitici che la corrente di una pila determina in un voltametro, costituisce una forte obiezione alla *teoria chimica della pila*, secondo la

quale (§ 293) il funzionamento elettrico di questa si deve a fenomeni chimici che in essa si producono, e non al contatto esterno fra i metalli che entrano a costituire la pila. La teoria chimica, come già dicemmo, sorse in opposizione alla *teoria di contatto* poco dopo la scoperta della pila. Alla controversia fra Galvani e Volta per spiegare il fenomeno scoperto dal Galvani, successe quindi una controversia per spiegare il comportamento della pila da questi scoperta.

La teoria chimica e quella del contatto sono sempre l'una contro l'altra armate, giacchè nessun fatto decisivo è ancora intervenuto che decida a favore dell'una o dell'altra. Le esperienze tendenti a dimostrare le differenze di potenziale di contatto (le esperienze classiche del Volta meno di altre recenti accuratissime) non possono escludere qualche azione chimica, se pure insignificante; e d'altro canto l'obiezione alla teoria chimica dipendente dai fenomeni elettrolitici interni alla pila toglie, fra altro, valore alla teoria chimica medesima.

§ 295. **Forza elettromotrice di una pila - Pile campione.** — L'elettricità si ritiene costituita, come già abbiamo avvertito, da particelle piccolissime, dette *elettroni.* La corrente elettrica sarebbe un fenomeno di caduta della elettricità attraverso al corpo conduttore che è sede della corrente medesima. Come la caduta di un corpo determinato tra due regioni dello spazio richiede un dislivello più o meno pronunciato, la caduta di elettricità che costituisce la corrente elettrica attraverso al filo che congiunge i due poli di una pila richiede fra questi, livelli elettrici differenti ossia diverso potenziale elettrico.

Tale dislivello elettrico si chiama *forza elettromotrice* della pila o anche, più volgarmente, tensione, perchè la si assimila ad una speciale pressione che spinge l'elettricità a formare la corrente elettrica. In genere si parla di tensione per ogni generatore di corrente elettrica. Una macchina elettrica, quali son quelle che abbiamo imparato a conoscere, ha una tensione ai suoi conduttori o, come si dice anche, una differenza di potenziale che può determinare o la scarica fra i conduttori medesimi o una corrente vera e propria in un filo metallico che ne congiuga gli estremi.

La unità di misura della forza elettromotrice è il *volta* già definito. Corrisponde sensibilmente alla forza elettromotrice di pile speciali, dette *pile campione.* Una di esse, di interesse più che altro storico, consiste in un recipiente contenente una soluzione opportuna di solfato di rame ed una di solfato di zinco mantenute separate dalla loro diversa densità e nelle quali si fa pescare rispettivamente una lamina di rame ed una lamina di zinco (Fig. 382). Una pila *campione* fra le più usate è la Weston. È costituita da un tubo di vetro in forma di H agli estremi inferiori dei rami paralleli della quale sono due elettrodi in platino. Contro al positivo sta mercurio con sopra solfato mercuroso mescolato a cristalli di cadmio. Contro al negativo sta una amalgama di una parte di peso di cadmio con sei di mercurio. Sopra a entrambi e attraverso anche al ramo trasversale del tubo sta una soluzione acquosa di solfato di cadmio. A 20° ha una f. e. m. di *volta* 1,0186.

La forza elettromotrice di un elemento Daniell ha il valore 1,06 *volta*; quella di un elemento Bunsen 1,9; quella di un elemento Grenet 2; e quella di un elemento Leclanché 1,5.

Le buone macchine elettrostatiche usate ora nei laboratori hanno ai loro conduttori delle tensioni che oltrepassano i 100000 *volta.*

Fra i poli di una pila, si ha maggior differenza di potenziale quando la pila non è chiusa in circuito o, come si dice, è a *circuito aperto,* di quando è chiusa in circuito o è a *circuito chiuso.* Alla già indicata differenza di potenziale a circuito aperto si dà la denominazione di *forza elettromotrice della pila,* riserbando la denominazione di *differenza di potenziale della pila* al caso del circuito chiuso.

§ 296. **Intensità di una corrente. Ampère.** — Quando congiungiamo, mediante un filo metallico, i due poli di una pila, si ha una corrente elettrica che procede secondo il senso convezionale dal polo positivo al polo negativo lungo il filo, e dal polo negativo al positivo nell'interno della pila. Orbene, nelle varie posizioni del circuito, tanto in un punto A, come in un punto B e come in un punto C, possiamo attendere al varco la elettricità che passa, sicuri che in un determinato tempo, per esempio nella unità di tempo, tanta ne passerà da A, quanto da B, quanto da C ecc.

La quantità di elettricità che nella unità di tempo passa attraverso ad una sezione qualunque del circuito ci definisce quantitativamente la corrente elettrica. La si chiama *intensità* della corrente. È una grandezza essa pure misurabile, e alla unità sua di misura si è dato il nome di *ampère* in onore del fisico francese G. M. Ampère. Corrisponde al passaggio di un *coulomb* nella unità di tempo.

§ 297. **Elettrolisi e sue applicazioni.** — Il passaggio della corrente elettrica in liquidi conduttori avviene secondo le modalità considerate nel § 278. Il fenomeno, detto di elettrolisi, ha larghe applicazioni, sia per il fatto semplice di decomposizione a termine delle leggi del Faraday, sia per l'intervento di azioni secondarie fra i prodotti della decomposizione e il solvente elettrolitico. Se si tratta ad esempio della elettrolisi di una soluzione acquosa di solfato di potassio i ioni *potassio* ed SO_4 reagiscono coll'acqua, il primo formando potassa caustica con svolgimento di idrogeno e l'altro formando acido solforico con svolgimento di ossigeno. La cosa porta a che il liquido in prossimità del catodo vien presto ad assumere proprietà basiche, mentre che in prossimità dell'anodo viene ad assumere carattere acido. Queste condizioni si possono dimostrare ricorrendo a cartine rossa ed azzurra rispettivamente di tornasole. La cosa si suol fare valendosi di un voltametro ad U quale è quello della Fig. 383.

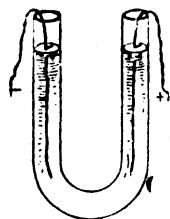



Fig. 383.

Del resto la elettrolisi stessa di acqua resa conduttrice o con tracce di un acido o con tracce di una base o con tracce di un sale è conseguenza di azioni secondarie dei ioni del corpo disciolto col solvente. Sia ad esempio il caso di acqua acidulata con acido solforico. L'ione idrogeno si libera al catodo ma l'ione SO^4 che va all'anodo reagisce coll'acqua per formare di nuovo acido solforico liberando ossigeno.

Galvanoplastica. — Le decomposizioni, nel senso indicato nel § 278, pag. 244, operate dalla corrente elettrica sono largamente uti-

lizzate nell'industria per le cosidette operazioni di galvanoplastica, quali il rivestimento, o di rame, o di oro, o di argento, o di nichel di un corpo sul quale interessi avere tale rivestimento.

Fig. 384.

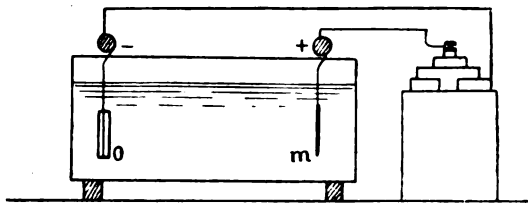
Basta che in una cassa contenente o una soluzione di solfato di rame, o una soluzione di cloruro di oro, o una soluzione di nitrato d'argento ecc., si faccia pescare rispettivamente a fungere da elettrodo positivo (anodo) una lamina di rame, di oro, di argento, e a fungere da elettrodo negativo (catodo) il corpo da rivestire, per ottenere l'intento desiderato. Se questo corpo è costituito da materiale non conduttore, lo si riveste con grafite che lo rende superficialmente conduttore (Fig. 384).

A mano a mano che il metallo contenuto nella soluzione va a depositarsi sul corpo costituente l'elettrodo positivo, il resto del corpo disciolto va sull'elettrodo negativo ad asportarvi del metallo e si ricostituisce il corpo, che subito si ridiscioglie e ripete indefinitamente il il giuoco finchè passi corrente e l'anodo non sia consumato interamente.

Fig. 385.

§ 298. **Accumulatori.** —

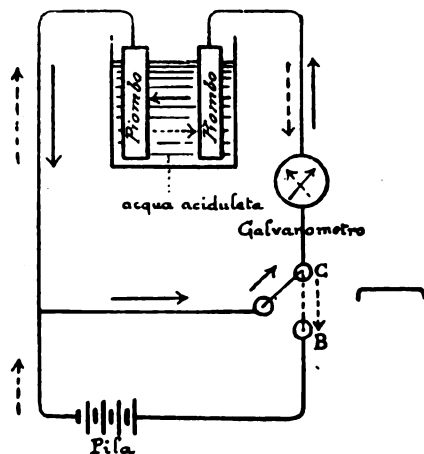
Un'altra applicazione interessantissima degli effetti chimici delle correnti si ha nei cosidetti *accumulatori*.

Supponiamo di far passare la corrente elettrica attraverso ad un voltametro che contenga tal liquido da originare, colla decomposizione sua, dei corpi atti a combinarsi cogli elettrodi del voltametro medesimo, si avrà modo di intensificare la forza elettromotrice di polarizzazione di cui si parlò al § 294, pag. 262. Staccando allora il voltametro dalla pila che gli forniva la corrente avremo in esso una nuova pila. Basterà difatti congiungere gli estremi degli elettrodi che saranno i poli della nuova pila, mediante un filo metallico, perchè questo venga attraversato da una corrente. Ebbene, questa corrente avrà senso opposto a quella usata dapprima per la elettrolisi, ma conterrà la stessa energia che aveva questa. Potremo dunque dire, che, usando un opportuno voltametro, sarà possibile immagazzinare in esso, mediante la elettrolisi, l'energia di una *corrente* che chiameremo *primaria*. Tale energia potrà essere restituita dal voltametro stesso sotto forma di corrente, che diremo *secondaria*, avente rispetto al vol-

Fig. 386.

tametro senso contrario alla primaria. La Fig. 385 rappresenta un dispositivo che consente di dimostrare la indicata possibilità di immagazzinamento d'energia nel senso detto. Col cavalletto metallico rappresentato a destra a parte, messo prima fra i pezzetti di mercurio *C* e *B* (mentre non esiste fra *C* e il pozzetto di sinistra il cavalletto che rappresenta la figura) si manda la corrente della pila nel voltametro ad elettrodi di piombo, e tale corrente primaria ha il senso rappresentato dalle frecce punteggiate secondo attesta il galvanometro. Togliendo il cavalletto da *CB* e mettendolo in posto come indica la figura si nota che il voltametro manda una corrente di senso opposto alla prima.

Gli accumulatori sono voltametri di tal genere, e si chiamano anche pile secondarie. I più comuni hanno elettrodi costituiti da più lastre di piombo opportunamente collegate in due gruppi (Fig. 386) rivestite da materiali opportuni (generalmente ossidi di piombo), e hanno come liquido elettrolitico una soluzione in acqua di acido solforico.

Quando si vogliano usare, si debbono prima caricare con una corrente primaria. Sopportano numerosissime cariche e scariche prima di rendersi inservibili. *Costante* notevole di un accumulatore è la f. e. m. (generalmente di 2 *volta*).

§ 299. **Potenza di una corrente. Watt.** — Possiamo ora fermarci sulla analogia esistente fra una corrente elettrica ed una caduta d'acqua. Il salto della cascata, ossia il dislivello di cui l'acqua può cadere, corrisponde, per il caso della corrente, alla forza elettromotrice del generatore di corrente; la portata della cascata corrisponde alla intensità della corrente.

E come la potenza della cascata, cioè l'energia meccanica che può dare in un minuto secondo, è misurata dal prodotto del salto per la portata, così per la corrente se ne deve considerare la *potenza* misurata dal prodotto della forza elettromotrice per l'intensità. La potenza di una cascata si suole esprimere in cavalli-vapore. La potenza di una corrente si suole esprimere in *watt*. Il *watt* corrisponde ad una corrente di un *ampère* di intensità lanciata da una forza elettromotrice di un *volta*, ed equivale ad $^1/_{736}$ del cavallo-vapore.

Se da una pila ricaviamo una corrente della potenza di un *watt* per un minuto secondo, veniamo a prendere da essa l'unità di energia elettrica che si dirà *watt-secondo*. Nella pratica usuale, si usa come unità per l'energia elettrica un multiplo del *watt* ricavato dal generatore per un tempo multiplo del minuto secondo. Precisamente si prende il *chilo-watt* pari a mille *watt*, o l'*etto-watt*, pari a cento *watt* ricavati per 3600 secondi, cioè per un'ora. Si chiamano tali unità rispettivamente *chilo-watt-ora* ed *etto-watt-ora*. I contatori di energia elettrica, che ormai si trovano in quasi tutte le case, danno appunto l'energia elettrica consumata in *chilo-watt-ora* od in *etto-watt-ora*.

Per semplicità, ma con evidente scorrettezza, si parla di *chilo-watt* o di *etto-watt*: s'intende però sempre parlare di *chilo-watt-ora* o di *etto-watt-ora*. Il *chilo-watt* e l'*etto-watt*, ripetiamolo, sono unità di misura per la potenza e non per l'energia.

Per tutto quanto si è detto, la potenza di una corrente si può ritenere misurata dal prodotto della forza elettromotrice che la genera per l'intensità sua. Ora, un prodotto di due numeri, come ad esempio

16 e 100, si può mantenere inalterato variando opportunamente i due numeri stessi. Basta, ad esempio, ridurre a metà, al terzo, al quarto ecc., uno e raddoppiare, triplicare, quadruplicare ecc. l'altro. Pel caso nostro il prodotto di 16 per 100 uguaglia il prodotto di 32 per 50, uguaglia il prodotto di 5,33... per 300, di 64 per 25 e così via.

Ebbene, una medesima energia elettrica potrà aversi nell'unità di tempo con una forza elettromotrice elevata e con un'intensità di corrente bassa, come con una bassa forza elettromotrice e alta intensità di corrente. Questo in una infinità di modi.

Una macchina elettrostatica è un generatore di energia elettrica ad elevata tensione ed a piccola quantità di elettricità, cosicchè le correnti che, attraverso ad un determinato conduttore, si possono da essa ottenere corrispondono ad un'altissima forza elettromotrice, ma hanno una straordinariamente piccola intensità di corrente, misurabile a frazioni piccolissime del *milli-ampère*, che è la millesima parte dello *ampère.*

Una pila elettrica invece è un generatore di corrente elettrica a bassa tensione, ma ad apprezzabile intensità.

§ 300. **Resistenza elettrica. Ohm.** — La corrente elettrica nel passare attraverso ad un conduttore incontra uno speciale attrito, che si chiama *resistenza elettrica* del conduttore, e che è differente, a parità di tutte le altre circostanze, da conduttore a conduttore. Più grande, ad esempio, per il ferro che per il rame, per questo che per l'argento.

Per un determinato conduttore omogeneo ed a sezione costante, un filo ad esempio, cresce proporzionalmente alla lunghezza del filo, e in ragione inversa della sua sezione.

Cosicchè in un conduttore di lunghezza l (in cm.) e di sezione s (in cm²) si ha una resistenza che, indicando con k un coefficiente di proporzionalità dipendente dal metallo, si può rappresentare colla relazione

$$R = k\frac{l}{s}. \qquad (79)$$

Si assume come unità di misura della resistenza, e si chiama *ohm* in onore del fisico tedesco Ohm, la resistenza che alla temperatura di 0° offre una colonna di mercurio di sezione costante, alta cm. 106,3 e della massa di gr. 14,45 (la sezione risulta così di circa 1 mmq.).

Al fine di confrontare la resistenza di conduttori differenti ed anche per calcolare la resistenza di un determinato conduttore, si considera la cosidetta *resistenza specifica* dei vari corpi, consistente nella resistenza opposta da un piccolo cubetto di 1 cm. di spigolo formato coi vari corpi e attraversato dalla corrente da una faccia a quella opposta. È il k della formola precedente. La resistenza specifica del rame è, alla temperatura di 0°, di *ohm* 0,00000165. Ne segue che un filo di rame lungo 35 chilometri ed avente 9 mm. di diametro ha per valore *ohm* 9,6.

Si considera in blocco come utile *costante*, la *resistenza* che oppone l'assieme costituente una pila od un accumulatore, e che si chiama *resistenza interna* dell'elemento. Per i vari tipi di accumulatori varia da 0,01 a 0,001 *ohm.*

§ 301. **La legge di Ohm.** — Il fisico tedesco Giorgio Simone Ohm mise in rilievo la circostanza che l'intensità I di una corrente generata da una certa differenza di potenziale $V' - V''$ in un conduttore ai cui estremi questa sia appunto applicata, risulta in ogni caso proporzionale alla differenza di potenziale medesima.

Cosicchè, se rimane inalterata ogni altra circostanza, raddoppiando, triplicando ecc. la forza elettromotrice; la intensità della corrente si raddoppia, si triplica ecc. Se si esprimono la intensità della corrente e la differenza di potenziale rispettivamente in *ampères* ed in *volta*, la quantità per la quale in ogni caso si deve moltiplicare la differenza di potenziale $V' - V''$ per avere il valore della intensità della corrente è l'inversa $\left(\frac{1}{R}\right)$ del valore della resistenza R del conduttore espressa in *ohm*. Cosicchè vale la relazione:

$$I = \frac{V' - V''}{R}. \qquad (80)$$

Questa relazione esprime quella che si chiama *legge di Ohm*.

È bene avvertire che la legge di Ohm è valida solo per i conduttori solidi e liquidi. Graficamente, mediante un sistema di assi lungo uno dei quali si indicassero i valori delle differenze di potenziali e lungo l'altro i valori delle corrispondenti intensità di corrente, essa sarebbe rappresentata da una retta inclinata su ciascuno dei due assi.

Se fra gli estremi del conduttore nel tratto considerato, è attiva una forza elettromotrice che faccia salire il potenziale di e si avrà invece della (80) la:

$$V' - V'' = IR - e. \qquad (80^{bis})$$

La rappresentazione grafica in questo caso deve tener conto della variazione di potenziale e, e conduce alla successione di due tratti rettilinei l'uno rilevato rispetto all'altro. Con più variazioni di potenziale lungo il tratto considerato si avrebbero più tratti rettilinei in successione, due a due successivamente nelle condizioni suindicate.

In base alla (80^{bis}) si può facilmente dimostrare che se si considera l'intero circuito di una pila avente la forma elettromotrice E, indicando con R_1 la resistenza del conduttore che congiunge i poli della pila e con R_2 quella propria della pila, si ha:

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2}. \qquad (81)$$

§ 302. **Il circuito elettrico.** — Per quanto si sia già ripetutamente usata questa locuzione è bene dire che chiamasi *circuito elettrico* una successione di conduttori percorsa o capace di venire percorsa da una corrente elettrica chiusa. In essa sarà intanto il generatore di corrente, una pila ad esempio. Vi sarà inoltre un congegno capace di lanciare o di interrompere la corrente: l'*interruttore*. Poi la successione di pezzi conduttori che colleghino un polo della pila all'interruttore e questo all'altro polo della pila. Siano ad esempio due fili metallici. Il circuito potrà quindi esser rappresentato come mostra la Fig. 387. Chiudendo l'interruttore passerebbe la corrente nel senso rappresentato dalle

frecce. Aprendolo, questa corrente sarebbe arrestata.

È chiaro che la corrente potrà in parte venire derivata dal circuito principale secondo una via o due o tre. Queste nuove vie si chiamano *derivazioni*. La Fig. 388 mostra la corrente principale con due derivazioni quali si avrebbero chiudendo l'interruttore. Ritorniamo alla corrente senza derivazioni, al circuito semplice della Fig. 387.

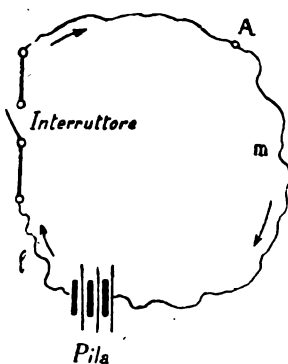



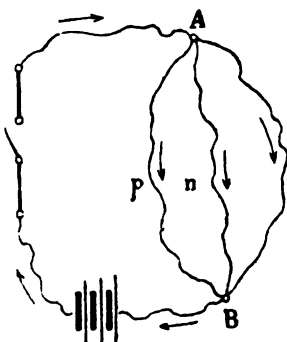
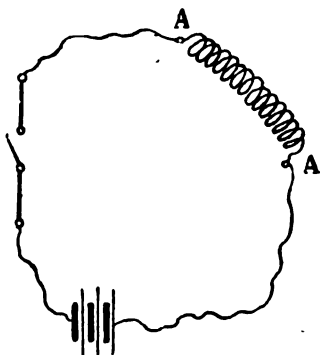
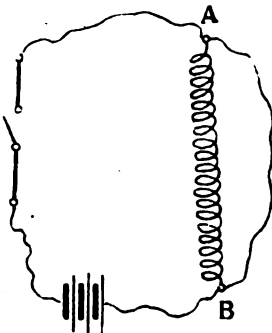
Fig. 387. *Fig. 388.*

Se si vuole che tale corrente attraversi un corpo qualunque, per esempio una matassa di filo metallico isolato alla superficie, come mostra la Fig. 389 si spezza il circuito in un punto e ciascuno degli estremi liberi *A* ed *A'* così ottenuti si attacca a ciascuno dei fili della matassa da inserire.

Fig. 389. *Fig. 390.*

Si dice che per tal modo la matassa è stata inclusa nel circuito, o anche è stata posta *in serie* nel circuito: mentre che se fosse stata attaccata coi suoi estremi in due punti *A* ed *B* del circuito senza spezzar questo essa avrebbe costituita una via derivata e si sarebbe detto di averla posta *in derivazione* (Fig. 390).

Ordinariamente, per unire assieme gli estremi di due fili si introduce l'estremo di uno in un foro di uno dei cosidetti *serrafili* rappresentati dalla Fig. 391 premendolo colla vite corrispondente. Nel foro libero del serrafilo usato vien fermato l'estremo dell'altro filo colla vite annessa.

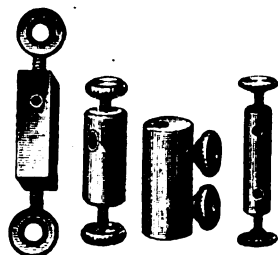



Fig. 391.

§ 303. **Reostati.** — Se si vorrà ottenere una regolazione della intensità della corrente che può fornire una certa pila, così che essa entro i limiti di potenza del generatore raggiunga un certo determinato valore, non si avrà che a regolare opportunamente la resistenza del circuito, il che suol farsi includendo in esso certe resistenze variabili,

dette *reostati*, una delle quali è rappresentata dalla Fig. 392. La manovella costituita da materiale conduttore salvo che nel manico e mobile intorno ad O su di un piano isolante cui sono infissi blocchetti metallici $A, B, C, D, \ldots$ colleganti due a due gli estremi di conduttori avvolti ad elica e dotati di una certa resistenza, può portarsi sui vari blocchetti e così includere nel circuito della corrente che nel reostato entra per D ed esce per O, una, due, tre... o nessuna delle eliche. Conviene che la larghezza della manovella sia tale, che mai, nel movimento, avvenga l'interruzione del circuito. Per ciò la manovella non deve abbandonare un blocco senza trovarsi già a contatto col successivo. La condizione non è realizzata nel reostato della Fig. 392.

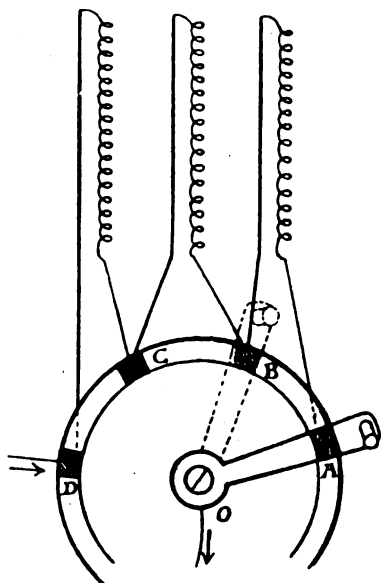



Fig. 392.

§ 304. **Principî o leggi di Kirchhoff.** — Nella generalità dei casi i circuiti non si presenteranno semplici ma con derivazioni e derivazioni di derivazioni un modo da avere numerosi tratti variamente intrecciantisi, così da dare origine a ciò che si suol chiamare una *rete*. Per lo studio delle reti percorse da correnti ci si può riferire alle proprietà fondamentali considerate pel caso di un circuito semplice col dividere idealmente detto circuito complesso in tanti circuiti semplici e coll'applicare il principio della sovrapposizione degli effetti consistenti in ciò che l'effetto totale ottenuto è uguale alla somma dei diversi effetti parziali dipendenti da ciascun circuito semplice. Grandi semplificazioni però si ottengono coi due principî fondamentali seguenti di Kirchhoff:

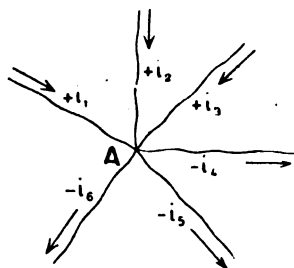
Fig. 393.

Si consideri un punto A a cui fanno capo diversi fili del circuito complesso considerato (Fig. 393); detto punto A si chiama *nodo*. Il primo principio asserisce: *In un nodo, la somma delle intensità delle correnti che arrivano è uguale alla somma delle intensità delle correnti che partono.* Si può anche dire, se si conviene di considerare positive le intensità delle correnti che arrivano al nodo e negative quelle delle correnti che partono dal nodo: *la somma algebrica della intensità delle correnti nel nodo è uguale a zero*:

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 - I_6 = 0.$$

Tale uguaglianza suol scriversi in forma generale simbolicamente con:

$$\Sigma I = 0. \qquad (82)$$

Questo principio, in fondo, era stato dimostrato col voltametro dal Faraday colla constatazione che la somma dei lavori elettrolitici della

corrente in più rami derivati da un ramo principale era uguale al lavoro operato in questo ramo principale.

Il secondo principio di Kirchhoff dice: *Per ogni poligono chiuso di una rete la somma algebrica delle forze elettromotrici attive nell'intero poligono è uguale alla somma algebrica dei prodotti delle intensità della corrente in ciascun tratto per la rispettiva resistenza del conduttore costituente il tratto stesso.* Si avrà quindi:

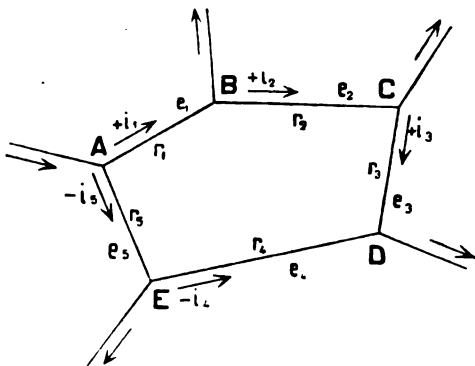



Fig. 394.

$$E_1 + E_2 + \dots = R_1 I_1 + R_2 I_2 + \dots$$

o, come suol scriversi simbolicamente:

$$\Sigma E = \Sigma IR. \qquad (83)$$

È opportuna una dilucidazione sul modo di applicare questa legge. Per il poligono chiuso da considerare si fissi a percorrerlo un senso arbitrario. Si assegni il segno + alle intensità di correnti che si dirigono nel senso del percorso, ed alle altre il segno —; le forze elettromotrici saranno positive se tenderanno a produrre correnti nel senso del percorso, negative se tenderanno a produrre correnti nel senso opposto. Allora sommando algebricamente (cioè coi loro segni) le forze elettromotrici, si scriverà che questa somma è uguale alla somma dei prodotti delle resistenze per le rispettive intensità considerate pure con il loro segno.

CAPITOLO XXXI.

MAGNETISMO.

§ 305. Calamite naturali ed artificiali - Poli magnetici - Attrazioni e ripulsioni.

— È noto da lungo tempo un minerale detto *magnetite*, contenente ferro e dotato della proprietà di attrarre il ferro se finamente diviso (Fig. 395).

Fig. 395.

Si sogliono chiamare *magnetici* quei corpi che sentono l'azione della magnetite, e *non magnetici* gli altri. Il ferro è magnetico per eccellenza. Magnetici sono pure, ma molto meno del ferro, il nichel ed il cobalto. Dovremo tornare più avanti (§ 322) su tale distinzione.

Si chiama *magnetismo* la causa di tale proprietà, e poichè riceve il nome di *calamita* ogni corpo che la possiede, la magnetite costituisce una *calamita naturale.*

Se si strofina una spranga di acciaio, sempre nello stesso senso contro un pezzo di magnetite, essa acquista

e conserva la proprietà magnetica, costituendo per tal modo una *calamita artificiale* (Fig. 408, 409 e 410).

Ponendo una spranga calamitata in seno a limatura di ferro, si nota, ritraendola, che la limatura aderisce quasi unicamente agli estremi della spranga stessa (Fig. 396). Sembra dunque che la proprietà magnetica di questa sia concentrata alle due estremità, che si chiamano *poli* della calamita. Una calamita artificiale può avere la forma parallelepida, o cilindrica, o la forma di ferro di cavallo. In ogni caso i poli si trovano agli estremi della spranga e la regione media si chiama *regione neutra.*

Fig. 396.

Qualche volta una calamita può possedere qualche polo intermediario fra gli estremi, separati essi pure da regioni neutre. Si chiamano *poli conseguenti* e si pongono in rilievo utilizzando la attrazione che essi determinano della limatura di ferro o con una esperienza di cui parleremo (§ 317 - Fig. 418), detta dello spettro magnetico. Oltre al modo di magnetizzare una spranga, già indicato, altri ne son stati suggeriti ai quali accenniamo, sebbene ormai poco usati, nelle leggende delle figure della pag. 279.

Fig. 397. - Esperienza analoga a quella del pendolo elettrico. All'attrazione però non segue la ripulsione.

Ma un processo ora generalmente in uso e del quale presto parleremo è quello che si serve di una corrente elettrica.

Fig. 398.

Poichè una calamita di qualunque forma, messa in condizioni di poter ruotare in un piano orizzontale intorno ad un asse passante per il suo centro, si dispone in direzione che poco differisce da quella procedente dal nord al sud, sempre essendo un medesimo polo quello che si rivolge al nord, ed un medesimo quello rivolgentesi al sud; uno dei poli, quello che si rivolge al nord, si chiama *nord*, e l'altro, quello rivolgentesi al sud, si chiama *sud*.

Se la calamita ha la forma di losanga allungata con un cappelletto in pietra dura nel centro per poter poggiare senza attrito su una punta acuminata, riceve il nome di *ago calamitato.*

Più aghi calamitati messi in condizione da non disturbarsi reciprocamente e da non esser disturbati da alcuna altra calamita o sistema magnetico, si dispongono tutti nella stessa direzione per la proprietà già indicata di orientarsi.

Fig. 399. - Come una calamita attrae un pezzo di ferro, così un pezzo di ferro attrae una calamita: l'azione è reciproca.

§ 306. **Legge del Coulomb.** — Fra i poli di due calamite si manifestono forze reciproche di attrazione e ripulsione analoghe alle forze elettriche. Così poli omonimi si respingono e poli di nome contrario si attraggono. Riesce facile vedere che poli magnetici dello stesso nome si respingono e poli di nome contrario si attraggono operando come indica la Fig. 398. Inoltre, come dimostrò Coulomb, anche le forze magnetiche obbediscono alla legge dei quadrati delle distanze (*legge di Coulomb*).

Con considerazioni analoghe a quelle fatte sulle quantità di elettricità si passa alla nozione di *quantità del magnetismo* e si può dire, che le forze magnetiche sono proporzionali alle *quantità di magnetismo*, o masse magnetiche fra cui quelle forze si manifestano.

Si suol dare il segno + alle masse magnetiche *nord* ed il segno — alle masse magnetiche *sud*.

Si può quindi scrivere anche qui:

$$F = k \frac{qq'}{r^2}. \qquad (84)$$

Questa formola, considerando le azioni nel vuoto e facendo astrazione dalla dipendenza di k dal mezzo interposto fra i poli magnetici fra loro agenti, permette di fissare una *unità di quantità di magnetismo* imponendo a k il valore 1; e ciò in modo analogo a quello considerato per le azioni elettriche.

Tale unità sarà quella massa magnetica che posta ad un centimetro di distanza da una massa uguale la respinge colla forza di una dine.

§ 307. **Esperienza della calamita spezzata - Costituzione dei magneti - Solenoide e lamina magnetica.** — Operando come indica la Fig. 400 è facile vedere che spezzando ripetutamente in parti di più in più piccole una lunga calamita, si ha in ciascuno dei pezzetti formatisi la doppia polarità nord e sud, come nella grande calamita.

Da ciò risulta che la proprietà magnetica di una calamita riguarda le ultime particelle che la costituiscono, cosicchè esse possono riguardarsi come altrettante *calamite elementari,* e che non è mai possibile separare un polo magnetico dall'altro, come è possibile invece avere elettricità soltanto positiva o negativa in un corpo.

Secondo Ampère in un corpo magneticamente neutro le calamite elementari sarebbero orientate in tutti i sensi; ma sottomettendo il corpo a magnetizzazione le molecole si orienterebbero *affacciandosi nell'interno* i poli opposti. Agli estremi rimarrebbero liberi da un lato poli *nord* e dall'altro poli *sud.* L'orientamento sarebbe facile in alcuni corpi (ferro dolce), men facile in altri (acciaio).

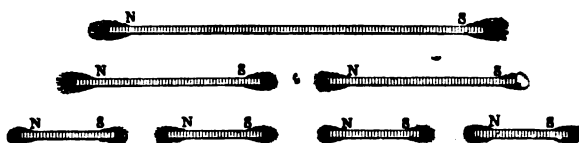



Fig. 400. - Esperienza della calamita spezzata.

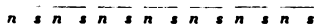
Sezionando normalmente all'asse una calamita si avrà per i due estremi nuovi che si formano, un polo nord per uno ed un polo sud per l'altro. In base alla teoria di Ampère sulla costituzione delle calamite si è pensato a due distribuzioni teoriche degli elementi magnetizzati nell'interno delle calamite medesime. Una calamita può essere costituita da un fascio di file elementari di molecole (Fig. 401) riunite l'una all'altra per i poli opposti. Tali file dette *solenoidi* avrebbero attivi soltanto i poli liberi delle due molecole estreme. Si può invece pensare che le molecole magnetiche elementari non sieno raggruppate a file, ma a strati sovrapposti formati ciascuno (Fig. 402) da molecole magnetizzate disposte a fascio parallelamente le une alle altre coi poli di un nome da una parte e con quelli di nome contrario dall'altra. Si tratterebbe di strati di molecole le cui facce estreme vicinissime sarebbero ricoperte l'una da magnetismo nord e l'altra da magnetismo sud. La calamita infinitamente sottile costituita da uno di questi fogli o strati ha ricevuto il nome di *lamina magnetica.*

n s n s n s n s n s n s n s

Fig. 401.

n s
n s
n s
n s
n s
n s
n s
n s
n s
n s

Fig. 402.

Si chiama *densità superficiale della lamina* il quoziente della massa magnetica q supposta uniformemente ripartita su ogni faccia per la superficie S della lamina stessa. Essa viene quindi espressa da

$$\sigma = \frac{q}{S}. \qquad (85)$$

Si chiama *potenza della lamina* il prodotto del suo piccolissimo spessore d per la densità magnetica superficiale σ. Essa viene quindi espressa da:

$$P = \sigma d. \qquad (86)$$

§ 308. **Momento magnetico.** — Si chiama momento magnetico di una calamita il prodotto della grandezza assoluta della quantità di magnetismo q contenuta in ciascun polo per la distanza d che separa i due poli. Lo si suole rappresentare con M. Sarà quindi

$$M = qd. \qquad (87)$$

§ 309. **Intensità di magnetizzazione.** — Si chiama *intensità di magnetizzazione* di una sbarra il quoziente del momento magnetico della sbarra per il suo volume V. Tale intensità I è data quindi dalla relazione:

$$I = \frac{M}{V}. \tag{88}$$

Viene ad essere il momento dell'unità di volume della sbarra se la magnetizzazione è uniforme od il valore medio di tale momento nel caso opposto.

§ 310. **Declinazione - Inclinazione - Poli magnetici terrestri.** — Il piano verticale che contiene l'asse di uno qualsiasi di tali aghi dicesi *piano del meridiano magnetico*.

A rigore, il meridiano magnetico fa un angolo col meridiano astronomico che per un medesimo tempo varia da luogo e luogo e che per un medesimo luogo varia da tempo a tempo. Tale angolo si chiama *declinazione* magnetica (Fig. 403 e 404) ed è uno degli elementi magnetici caratteristici dei vari luoghi della superficie della Terra. L'asse di una calamita libera completamente di orientarsi forma col piano dell'orizzonte un angolo che riceve il nome di *inclinazione* (Fig. 405) e che varia da tempo a tempo per un medesimo luogo e da luogo a luogo per un medesimo tempo. È un altro elemento magnetico caratteristico dei vari luoghi della superficie della Terra.

Le curve che congiungono i luoghi di uguale declinazione magnetica hanno andamento grossolanamente simile ai meridiani geografici, epperò si chiamano *meridiani magnetici.* Le linee che congiungono luoghi di uguale inclinazione hanno andamento grossolanamente simile ai paralleli geografici e si chiamano *paralleli magnetici.*

Ne segue la considerazione dei *poli magnetici terrestri,* luoghi per i quali l'inclinazione ha il valore di 90°. Essi si trovano, uno verso la terra del principe di Galles e l'altro al sud nella terra Vittoria.

§ 311. **L'azione della Terra si riduce ad una coppia.** — L'azione della Terra su un ago calamitato si riduce ad una coppia. Questo si può dimostrare sperimentalmente facendo galleggiare sull'acqua un ago calamitato sopra un sostegno di sughero (Fig. 406): l'ago si orienta ruotando ma non subisce alcun spostamento. Se l'azione della Terra sulla calamita si riducesse ad una forza, questa, ammetterebbe una componente verticale ed una orizzontale, la quale ultima farebbe spostare la calamita.

§ 312. **Bussole.** — Gli aghi calamitati sono la parte essenziale delle cosidette *bussole,* strumenti che servono alla orientazione. Particolarmente importante è, come si sa, la *bussola marina* (Fig. 407).

§ 313. **Influenza magnetica.** — Si chiama fenomeno di *influenza magnetica* un fenomeno per cui collocando in prossimità di una calamita (Fig. 411, 412 e 413) ed in successione, una, due ecc. spranghe di ferro dolce, queste, assumono ciascuna, polarità opposta a quella più vicina della calamita nelle estremità a questa più prossime, e polarità dello stesso nome nelle estremità più lontane. Utilizzando l'influenza si armano le calamite naturali (Fig. 414).

Magnetismo terrestre.

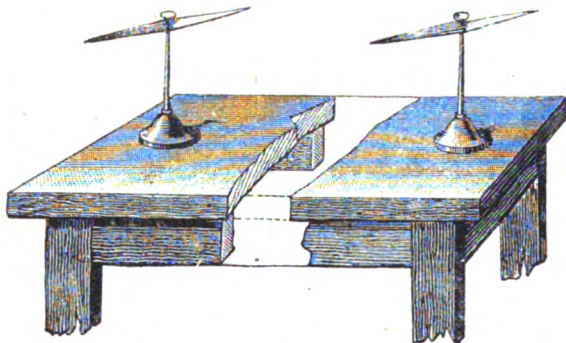



Fig. 403. - I vari aghi magnetici si dispongono tutti parallelamente e coi poli omonimi rivolti dalla stessa parte.

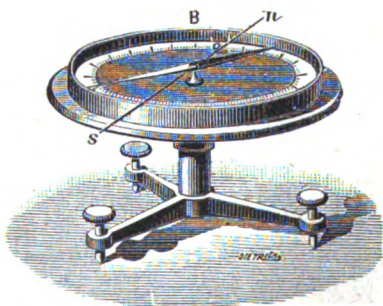



Fig. 404. - Un ago che mostra la declinazione (ago di declinazione) del luogo ove si trova. Il quadrante graduato permette di misurarla.

Fig. 405. - Un ago disposto in modo da mostrare l'inclinazione del luogo ove si trova (ago di inclinazione). Il piano del quadrante e dell'ago deve disporsi nel meridiano magnetico.

Fig. 406. - L'azione della Terra su di una calamita si riduce ad una coppia.

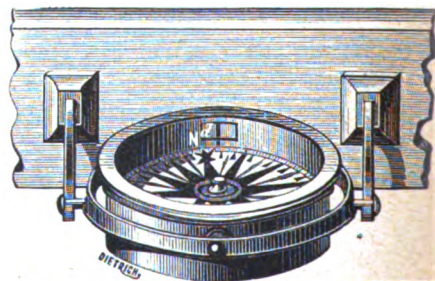



Fig. 407. - L'ago calamitato è poggiato su di un perno adattato al centro del fondo della scatola cilindrica sostenuta da un supporto cardanico e sopporta un disco di mica ricoperto da una *rosa dei venti.* Si guida la nave conducendo un raggio della rosa nella direzione della linea *d* tracciata sulla parete interna della scatola e detta *linea di fede.* Tale linea è disposta in guisa che il piano passante per essa e per il perno sia parallelo alla *chiglia* della nave.

Calamitazione con metodi indipendenti da azioni elettriche.

Nel *Metodo del semplice contatto*, si trascina ripetutamente, e sempre nel medesimo senso, un polo di una forte calamita nel nucleo da magnetizzare. Va bene per nuclei corti e grossi, ma dà spesso dei punti conseguenti. (Omettiamo la figura rappresentativa).

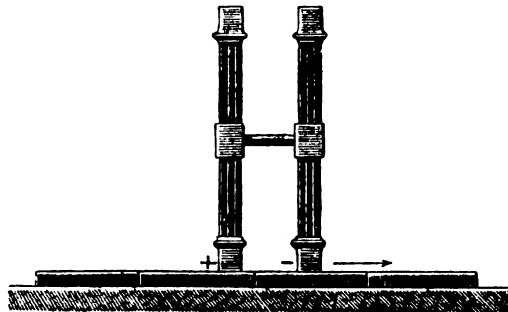



Fig. 408. - Uno dei tre metodi del doppio contatto: Il metodo di Mitchell. Si dispongono in successione varie spranghe da calamitare e si fanno scorrere su di esse due forti calamite disposte parallelamente coi poli opposti e collegate con materiale non magnetico. Le spranghe mediane sono quelle che meglio si magnetizzano.

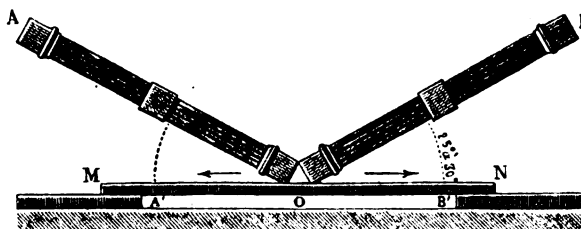



Fig. 409. - Il metodo del doppio contatto suggerito dal Duhamel e detto anche metodo del doppio contatto separato. Il nucleo *MN* da magnetizzare vien posto coi suoi estremi sui poli contrari di due potenti calamite *AB*. Si prendon altre due calamite *A* e *B* che si inclinano di 25 a 30° sulla regione mediana della sbarra mettendo di fronte i poli di nome contrario e avendo cura che ciascuno di questi poli sia dal lato del polo dello stesso nome appartenenti alle calamite fosse *AB*. Facendo scorrere ripetutamente in senso contrario le due calamite mantenute sempre nella medesima inclinazione si fanno sorgere in *M, N* poli di nome contrario a quelli *AB* delle calamite adoperate.

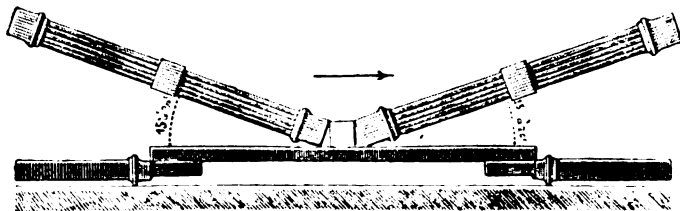



Fig. 410. - Metodo del doppio contatto di Epino. Differisce da quello del Duhamel in ciò che le calamite mobili sono legate fra loro come quelle di Mitchell, sono mantenute inclinate sulla superficie del nucleo da magnetizzare e si fanno scorrere nel medesimo senso. La migliore inclinazione è quella da 15 a 20°. Questo metodo è il più energico, ma dà dei poli secondari.

Fig. 411.

In tutte le esperienze di influenza magnetica (sono in fondo esperienze di influenza anche quelle delle figure 397 e 399), il ferro dolce perde poi immediatamente la proprietà magnetica acquistata, appena si allontani la calamita.

È un fatto costante questo, che il ferro assume con facilità la proprietà magnetica ma la perde immediatamente dopo cessata l'azione che gliela ha procurata.

Al magnetismo, che assume per influenza il ferro dolce o puro si dà perciò il nome di *temporaneo*. Se il ferro non è puro la magnetizzazione per influenza non cessa quando si allontana la calamita influenzante. In tal caso il magnetismo persiste, debolmente col ferro impuro, fortemente coll'acciaio: costituisce il cosidetto *magnetismo residuo*. Si dà la denominazione di *forza coercitiva* alla proprietà di conservare una parte di magnetismo dopo cessata l'azione di influenza. Va notato che l'acciaio, acquista (§ 307) la proprietà magnetica con una certa difficoltà, e corrispondentemente la perde con grande difficoltà, ha cioè elevata forza coercitiva. Per questo le calamite si fanno in acciaio.

Fig. 412.

§ 314. **Campo magnetico - Gauss.** — Ogni regione dello spazio nella quale si faccia sentire un'azione magnetica si chiamerà *campo magnetico*. Intorno ad una calamita esiste il campo magnetico dovuto ad essa e tale che in ogni punto dello spazio che esso occupa si farà sentire azione di attrazione o di repulsione su poli magnetici e di attrazione

su frammenti di ferro che si magnetizzano per influenza, come avviene nell'esperienza delle figure 411 a 413.

Si dice *forza magnetica* in un dato punto, la forza che vi esisterebbe, se in quel punto si collocasse un polo magnetico unitario nord. E qui si potrebbero ripetere considerazioni analoghe a quelle che si fecero per il campo elettrico. Così come si potrà parlare di forza magnetica in un dato punto del campo, si potrà parlare di *potenziale magnetico*, di *superficie di livello del campo magnetico*, di *linee di forza magnetica*, di *flusso magnetico*.

Fig. 413.

Campo magnetico uniforme sarebbe un campo le cui linee di forza fossero fra loro equidistanti e parallele. È difficile realizzare praticamente un campo siffatto. La direzione ed il verso delle linee di forza sarebbero la direzione ed il verso del campo.

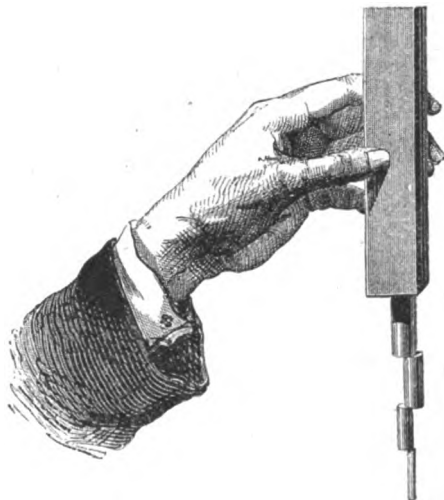



Fig. 414. - Un magnete naturale armato, sostenuto, cioè da un telaio che ha espansioni di ferro p, p' dolce contro ai poli, e che fungono esse stesse da poli.

Le linee di forza passanti per un centimetro quadrato di superficie normale ad esse sono infinite. *Si conviene* di considerarne tante quante ne esprime la intensità del campo. Con questa convenzione si può quindi rappresentare graficamente l'intensità del campo. Un campo uniforme sarà quindi rappresentato da linee di forza parallele ed equidistanti.

La forza agente su una massa magnetica q collocata in un campo di intensità H, per ciò che più sopra si disse, sarà data da:

$$F = qH. \qquad (89)$$

Se in questa relazione si pone $F = 1$ e $q = 1$ risulta $H = 1$. Il che ci permette di definire l'*unità di intensità di campo magnetico* come l'*intensità di un campo che agisce colla forza di 1* dine *sopra l'unità di massa magnetica.*

A tale unità si è dato il nome di *Gauss*.

Se la superfice attraversata dalle linee di forza è un piano, perpendicolare alla direzione del campo e questo è uniforme, si ha per il flusso φ l'espressione:

$$\varphi = HS. \qquad (90)$$

Se $S = 1$, da questa relazione risulta che l'intensità del campo viene espressa dal flusso attraverso all'unità di area. Se $S = 1$ ed $H = 1$, risulta $\varphi = 1$. Si potrà dunque definire l'*unità di flusso* come *il flusso* attraverso l'unità (un centimetro quadrato) di superficie perpendicolare ad un campo uniforme di intensità unitaria (un *gauss*). A questa unità si è dato il nome di *Maxwell*.

Campo magnetico rotante. — Se la direzione ed il verso di un campo uniforme rotassero intorno a un asse perpendicolare al campo si avrebbe un *campo magnetico rotante.* Approssimativamente lo si otterrà se si fa ruotare con velocità uniforme una calamita conveniente (a ferro di cavallo p. es.) attorno ad un asse perpendicolare alla congiungente i due poli od in altro modo come si dirà (§ 370). Esso gode fra altre della proprietà seguente. Se si pone in esso una massa metallica qualunque, questa tende a ruotare con il campo (§ 352).

§ 315. **Potenziale in un punto dovuto ad un solenoide magnetico.** — Abbiamo detto che per gli effetti esteriori un solenoide magnetico equivale alle due masse magnetiche estreme $+q$ e $-q$. Ne segue che il potenziale magnetico in un punto del campo dovuto al solenoide ha per espressione:

$$V = \frac{q}{r} - \frac{q}{r'} \qquad (91)$$

se r ed r' designano le distanze rispettive degli estremi del solenoide dal punto considerato nel campo.

§ 316. **Potenziale in un punto dovuto ad una lamina magnetica.** — Si dimostra che il potenziale magnetico V in un punto del campo dovuto ad una lamina magnetica è dato dal prodotto della potenza P della lamina per l'angolo solido ω sotto il quale si vede dal punto la faccia nord della lamina.

Si ha cioè:

$$V = P\omega. \qquad (92)$$

§ 317. **Spettro magnetico.** — Allorchè si pone una calamita sotto un foglio di carta od un cartoncino cosparso di limatura di ferro e che si scuote leggermente, le particelle di limatura si spostano e si orientano, in virtù della influenza magnetica alla quale sono soggette, in modo da disegnare delle linee la cui forma varia con il campo. Si può dimostrare che colla loro tangente danno in ogni punto la direzione della forza magnetica. Ne segue che esse corrispondono a *linee di forza* del campo. L'insieme delle linee di limatura ottenute nel modo indicato costituisce ciò che si chiama uno *spettro magnetico.* Lo spettro magnetico permette dunque di materializzare in certo modo le linee di forza e di rappresentarle fedelmente quando la direzione del campo è

Spettro magnetico.

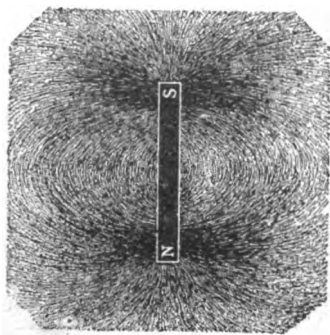



Fig. 415.

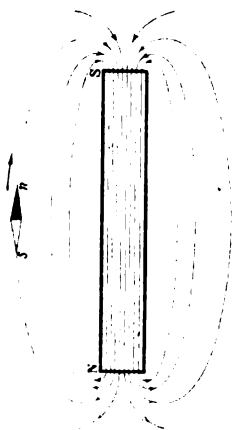



Fig. 416.

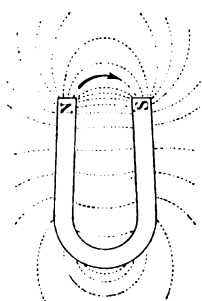



Fig. 417.

Senso convenzionale attribuito alle linee di forza.

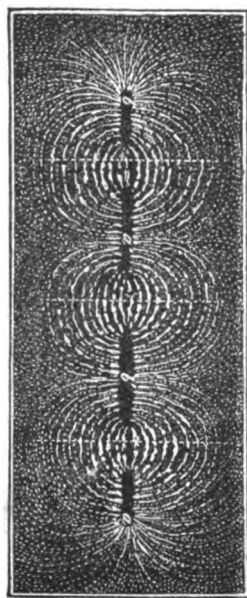



Fig. 418. - Spettro dovuto a poli conseguenti o secondari di una calamita.

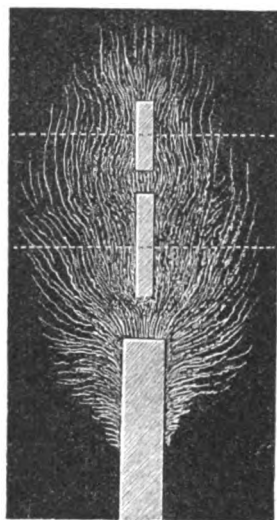
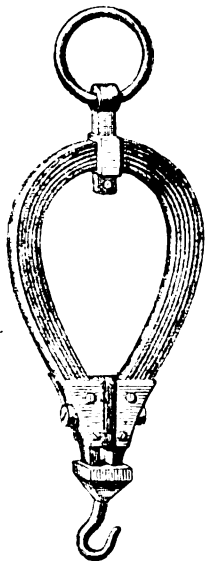



Fig. 419. - Spettro dovuto, per effetto di influenza, ad una calamita e a due spranghette di ferro dolce prossime a questa ed in successione.

in ciascun punto della limatura parallelo al piano del foglio di carta. Per una calamita rettilinea si vede bene nelle figure 415 e 416 quale è l'andamento di tali linee di forza.

Per queste linee di forza si considera un senso convenzionale, che è quello procedente all'esterno della calamita dal polo nord al polo sud.

Al fine di avere un'idea dell'andamento di tali linee di forza per il campo generato dalle principali forme di calamita, basta eseguire per ciascuna di esse l'esperienza dello spettro magnetico.

La Fig. 417 mostra la forma tipica di spettro per una calamita a ferro di cavallo. (Vedi anche le figure 418 e 419).

§ 318. **Suscettibilità magnetica.** — Si chiama *suscettibilità magnetica* di un materiale magnetico il rapporto k fra l'intensità di magnetizzazione che si determina in esso collocandolo in un campo magnetico, e l'intensità H di questo campo. Si ha cioè:

$$I = kH. \qquad (93)$$

La considerazione della intensità di magnetizzazione permette la misura del magnetismo intrinseco di una calamita, si tratti di magnetismo temporaneo ovvero di magnetismo permanente.

Vi è però un altro modo di raggiungere lo stesso intento, che considereremo nel paragrafo seguente.

Fig. 420.

Jamin ha trovato che a parità di tutte le altre condizioni, delle lamine di acciaio a piccolo spessore acquistano una intensità di magnetizzazione assai più grande che delle sbarre grosse. In conseguenza di ciò ha suggerito l'uso di fasci di lamine invece che sbarre massicce per la formazione delle calamite. La Fig. 420 rappresenta una calamita Jamin a ferro di cavallo. Le estremità delle lamine sono incastrate in due pezzi di ferro dolce che si magnetizzano e danno ciascuno poli dello stesso nome di quelli che riuniscono.

§ 319. **Induzione magnetica.** — Dividendo il flusso φ che traversa la sezione mediana S di una sbarra calamitata, per la sezione, si ottiene un quoziente che rappresenterà il flusso corrispondente all'unità di sezione. Lo si chiama *induzione magnetica della sbarra* e caratterizza evidentemente la magnetizzazione. Lo si rappresenta con B ed ha per unità il *gauss*. Sarà

$$B = \frac{\varphi}{S}. \qquad (94)$$

Ecco qui l'altro modo di valutare il magnetismo intrinseco di una calamita, cui si accennò nel § 318.

§ 320. **Forza portante di una calamita.** — Sezioniamo con un piano normale all'asse una calamita. La forza F necessaria per separare le due parti (forza uguale a quella occorrente per separare da un

polo un pezzo di ferro dolce di uguale sezione della calamita e disposto con perfetta aderenza), si chiama *forza portante della calamita.* La sua espressione in *dine* è:

$$F = \frac{B^2 S}{8\pi}, \tag{95}$$

se B è l'induzione ed S la sezione.

Come sappiamo già, si dà spesso alla calamita una forma incurvata che la fa assomigliare più o meno ad un ferro di cavallo. Questa forma è la più usata perchè permette di ottenere un campo esterno relativamente intenso e perchè le calamite a ferro di cavallo sono suscettibili di una forza portante assai più grande di quella delle calamite retilinee.

§ 321. **Permeabilità - Coefficiente di permeabilità.** — Poniamo fra i due rami di una calamita a ferro di cavallo e perpendicolarmente alla loro direzione un pezzo prismatico di ferro dolce ed esploriamone il campo col ripetere l'esperienza dello spettro magnetico. Prima che si fosse collocato il pezzo di ferro le linee di forza erano pressochè parallele fra loro e perpendicolari ai rami della calamita. Dopo, esse si sono spostate in modo da venire a passare in gran numero nella spranga di ferro dolce. Si esprime il fatto dicendo che il ferro dolce è più *permeabile* alle linee di forza che l'aria. E poichè ad un relativamente maggiore numero di linee di forze corrisponde una maggiore intensità per la forza magnetica, si dice che là dove si addensano le linee di forza viene anche ad accrescersi l'intensità del campo.

Collocando dunque o spostando in un campo magnetico un corpo, come il ferro capace di sentire l'azione magnetica, si modifica la costituzione del campo e quindi anche localmente la intensità di questo.

Si chiama *coefficiente di permeabilità* il rapporto μ fra l'induzione B e il campo induttore H. Si ha cioè:

$$\mu = \frac{B}{H}. \tag{96}$$

§ 322. **Corpi fortemente magnetici, paramagnetici e diamagnetici.** — Torna ora opportuno che ritorniamo sulla distinzione che ordinariamente si fa (§ 305) fra corpi magnetici e corpi non magnetici. In realtà tutti i corpi sono magnetici, gli uni come il ferro *fortemente,* gli altri *debolmente.* Questi ultimi si distinguono in *paramagnetici* ed in *diamagnetici* ed hanno tutti la permeabilità magnetica di poco diversa dall'unità. Per i paramagnetici è di poco superiore ad 1 e per i diamagnetici di poco inferiore. Va notato che i corpi diamagnetici messi in un campo magnetico assumono polarità opposta a quella assunta dai paramagnetici e dai fortemente magnetici. Così il bismuto, che è il corpo diamagnetico tipo, portato in un forte campo magnetico, si magnetizza con polarità invertita rispetto a quella che prenderebbe un pezzo di ferro e subisce quindi una ripulsione per parte di un forte polo cui si avvicini.

Per i corpi a debole magnetizzazione il coefficiente di permeabilità si mantiene costante e determinato, all'opposto di quel che si verifica, per i corpi a forte magnetizzazione.

§ 323. **Analogie e differenze fra i fenomeni elettrici e quelli magnetici - Schermi magnetici.** — Il rapido accenno ai fenomeni magnetici ci ha fatto conoscere molte rassomiglianze fra questi ed i fenomeni elettrici. Se vi sono rassomiglianze vi sono però anche delle marcatissime differenze. Così non è possibile separare un polo magnetico di una calamita dall'altro (§ 307); l'attrazione di un corpo magnetico per parte di una calamita non è seguita da una repulsione (Fig. 397) come avviene invece nel caso della elettricità; la distribuzione del magnetismo non è superficiale come è invece quella della elettricità; l'esperienza della calamita spezzata, fondamentale per il capitolo del magnetismo, non ne ha una analoga in elettrostatica; l'azione magnetica si esercita attraverso ad isolanti od a conduttori, salvo che attraverso al ferro in grosso spessore.

In base all'ultima circostanza suindicata si possono e si realizzano frequentemente degli *schermi magnetici* o gabbie chiuse, in ferro, tali che nel loro interno non si faccia sentire l'azione di calamite situate all'esterno.

CAPITOLO XXXII.

ELETTROMAGNETISMO.

§ 324. **Esperienze di Oersted e regola di Ampère.** — Una corrente elettrica esercita intorno a sè azione magnetica. Ciò venne messo in rilievo la prima volta da un'esperienza di Oersted, consistente nel fare deviare un ago magnetico con una corrente disposta parallelamente ad esso. Ampère, per fissare il senso della deviazione, stabilì la seguente convenzione tutt'ora usata. Per individuare la destra e la sinistra della corrente suppose che la corrente stessa entrasse per i piedi ed uscisse per la testa di un uomo disposto lungo di essa e rivolto verso l'ago: la destra e la sinistra dell'uomo in queste condizioni corrispondono alla destra ed alla sinistra della corrente (Fig. 421). Orbene, nella esperienza di Oersted la deviazione dell'ago avviene sempre, per modo che il polo nord di questo si porti verso la sinistra della corrente.

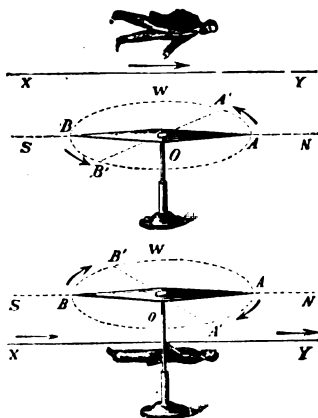
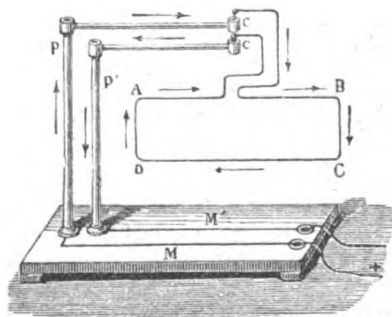



Fig. 421.

Fig. 422.

Reciprocamente una calamita agisce su di una corrente.

Per dimostrare l'azione di una calamita su di una corrente basta realizzare una disposizione sperimentale che permetta di ottenere una

corrente mobile. Ottima disposizione è quella di Ampère. Due colonne metalliche (Fig. 422) sostengono due bracci metallici orizzontali che portano agli estremi uno scodellino metallico con fondo di vetro o di pietra dura pieno di mercurio. Un telaio in filo metallico, rettangolare come quello della figura, o di altra forma, è aperto e munito di estremi a punta che possono collocarsi rispettivamente nei due scodellini pieni di mercurio. Mettendo a posto nel modo indicato il telaio e stabilendo la comunicazione fra le colonne ed i due poli di una pila, si ottiene per il tratto costituito dal telaio una corrente mobile. Avvicinando un polo magnetico a questa corrente mobile si ha la deviazione di questa.

§ 325. **Formola di Laplace.** — La legge quantitativa della azione di una corrente su di un polo magnetico fu enunciata dal Laplace; ma considera in via teorica l'azione che eserciterebbe un elemento l di corrente se potesse esistere isolato, su di un polo magnetico contenente una quantità q di magnetismo. Se con r rappresentiamo la distanza del punto medio dell'elemento dal polo, con I l'intensità della corrente, con α l'angolo formato dall'elemento colla retta che ne congiunge il punto medio al polo, la forza f (il cui senso è conforme alla regola di Ampère) viene espressa dalla formola

$$f = k \frac{qIl \operatorname{sen} \alpha}{r^2}. \qquad (97)$$

Da essa risulta che l'intensità del campo nel centro di una corrente circolare di raggio r è data in *gauss* (usando per le altre grandezze le solite unità) da:

$$H = \frac{2\pi I}{10r}. \qquad (98)$$

Se si tratta di un circuito con N spire si ha:

$$H = \frac{2\pi NI}{10r}. \qquad (99)$$

§ 326. **Campo magnetico delle correnti.** — Un filo percorso da una corrente elettrica, come prova la esperienza dello spettro rappresentata dalla Fig. 423, ha tutt'intorno un campo magnetico, le cui linee di forza sono cerchi concentrici col centro sul filo ed in piani perpendicolari a questo nei vari punti.

Se il filo è piegato a cerchi, come mostrano le figure 424 e 425, la forma del campo è in armonia con quella suindicata: le linee di forza sono concatenate colla corrente.

Se il filo viene piegato ad elica colle spire vicine, così da costituire quello che si chiama un *solenoide*, la forma del campo rivelato dallo spettro magnetico ricorda quella del campo di una calamita (Fig. 426). Piegandolo in modo (Fig. 427) da poterlo mettere nel dispositivo di Ampère e collocandolo, quando venga attraversato dalla corrente, si orienta come un ago.

Ciò porta a ritenere, e numerosissime esperienze lo provano, che un filo piegato a cerchio e percorso da una corrente si comporti come una sottile *lamina calamitata* oppostamente alle due facce, ed un solenoide si comporti come una calamita cilindrica coi due poli agli estremi.

Ampère ha difatti dimostrato che *le azioni magnetiche di una corrente sono quelle stesse che produrrebbe una lamina magnetica avente*

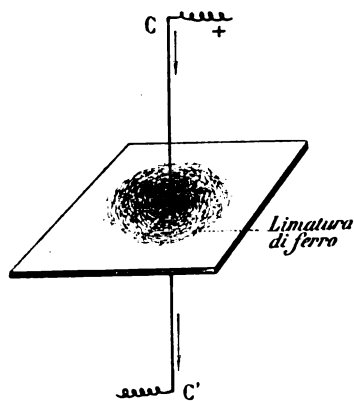



Fig. 423.

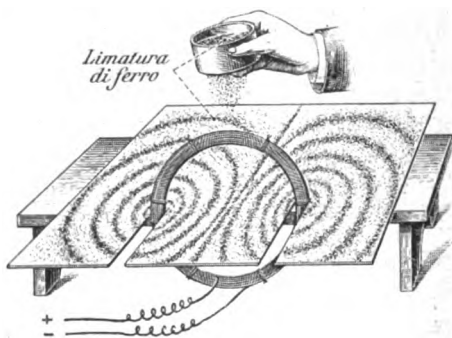



Fig. 424.

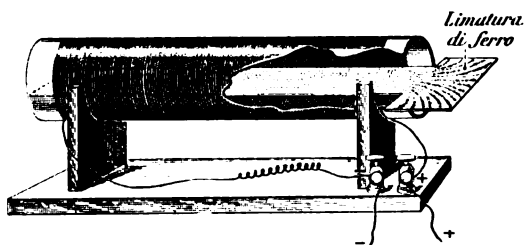



Fig. 426.

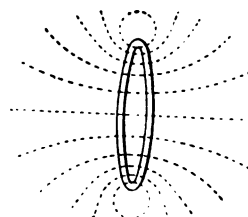



Fig. 425.

per contorno il circuito e la cui potenza fosse proporzionale alla intensità della corrente. Questa scoperta è stata di altissima importanza giacchè ha collegati fra loro i fenomeni della elettrodinamica e quelli del magnetismo permettendo di applicare ai primi le proprietà meccaniche dei secondi.

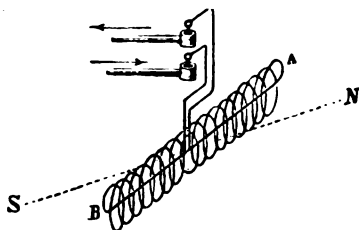



Fig. 427.

§ 327. **Potenziale di una corrente in un punto.** — La espressione del potenziale magnetico in un punto del campo per effetto di una corrente di intensità I è difatti:

$$V = kI\omega, \qquad (100)$$

se ω è l'angolo solido sotto il quale si vede la faccia nord (faccia dalla quale un osservatore vede la corrente circolare in senso inverso al moto delle lancette di un orologio).

§ 328. **Regola del cavatappi.** — Per fissare il senso delle linee di forza magnetica intorno ad un conduttore rettilineo o circolare percorso da una corrente della quale si conosce il senso, giova splendidamente una regola suggerita dal Maxwell, detta del cavatappi, che può usarsi in due modi non differenti sostanzialmente fra di loro. Se si ha una corrente rettilinea, si immagini di avvicinare un cavatappi nella direzione e nel senso in cui va la corrente: le linee di forza avranno allora il senso

del moto di rotazione del cavatappi (Fig. 428).

Per un conduttore circolare od un solenoide si suppone di far girare il cavatappi disposto sulla direzione dell'asse nel senso in cui gira la corrente nella o nelle spire: la direzione ed il senso delle linee di forza magnetica è indicata dal senso secondo cui si sposta il cavatappi. Da questa ultima regola risulta molto facile fissare il polo nord ed il polo sud del solenoide. Sarà polo nord quello guardando il quale la corrente sembri circolare in senso opposto a quello del moto delle lancette di un orologio. Sarà polo sud quello per cui si noti l'opposto.

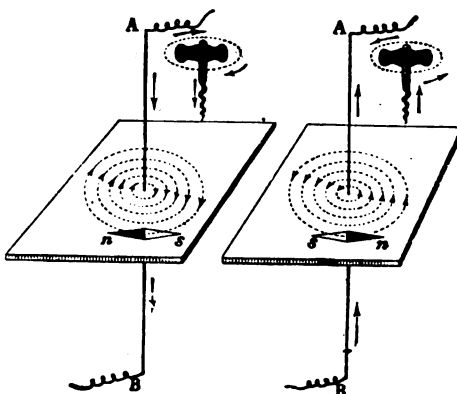



Fig. 428.

§ 329. **Curve di magnetizzazione - Isteresi.** — Consideriamo una massa magnetica collocata nell'interno di un rocchetto che possa farsi attraversare da una corrente, e supponiamo che, col crescere della intensità di questa, si faccia gradatamente crescere il valore del campo induttore H. Orbene, l'esperienza prova che corrispondentemente, l'induzione B aumenta ma in modo che dapprima la variazione è pic-

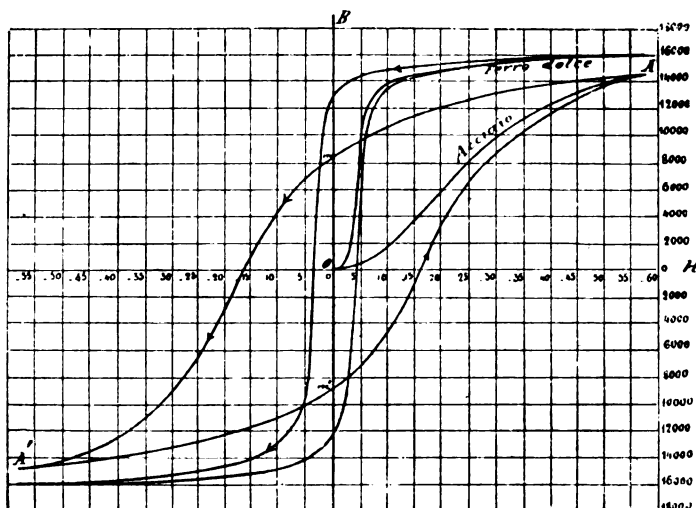



Fig. 429.

cola, poi molto forte e poi per campi elevati la variazione diventa così piccola da mostrare che la magnetizzazione tende verso un massimo.

La cosa può rappresentarsi graficamente con un sistema di assi in uno dei quali si rappresentino i valori del campo induttore e nell'altro i valori corrispondenti della induzione. Si ottengono così curve come la OA per l'acciaio o l'analoga per il ferro dolce della Fig. 429, dette *curve di*

magnetizzazione. Da queste curve si può ottenere con facilità il coefficiente di permeabilità che corrisponde ad una induzione data B: basta dividere B per l'ascissa H del punto della curva che ha per ordinata B.

Se, dopo aver fatto crescere progressivamente il campo magnetizzante un nucleo magnetico, di acciaio ad es. (Fig. 429), lo si fa decrescere in modo regolare, l'induzione non ripassa per gli stessi valori per i quali era passata nel processo di magnetizzazione, di guisa che, quando il campo si annulla in O, l'induzione conserva un certo valore Om che rappresenta il *magnetismo residuo*. Facendo poi agire il campo in senso contrario si constata che l'induzione scompare interamente per un valore del campo che si può dare come misura della *forza coercitiva*. Infine assoggettando il nucleo a dei campi alternativamente uguali e di segno contrario, si osserva per ogni successione completa di variazioni del campo, che la variazione dell'induzione si traduce in una curva chiusa come AA'. Le si dà il nome di *curva isteretica* perchè al fenomeno tipico di variazione dell'induzione col campo si dà il nome di *isteresi*.

Le trasformazioni corrispondenti costituiscono ciò che si dice un *ciclo magnetico o di isteresi*. L'esperienza prova che il nucleo soggetto ad un ciclo si riscalda. Questo calore è energia tolta alla corrente magnetizzante e costituisce una perdita. Il suo valore è proporzionale all'area racchiusa dalla curva isteretica. È un altro esempio di *degradazione dell'energia*.

§ 330. **Conservazione delle calamite - Circuito magnetico.** — Mettendo in un campo magnetico una sbarra da magnetizzare, il campo in ogni momento è magnetizzante, favorevole cioè alla magnetizzazione. Togliendo, dopo magnetizzazione, la calamita dal campo ed abbandonandola a sè, il campo proprio della calamita ha su questa una azione magnetizzante che può sopprimersi collegando i due poli mediante una massa di ferro dolce. A questo artificio si ricorre comunemente per conservare alle calamite la loro magnetizzazione (Fig. 414 e 420). Si dice che *si chiude il circuito magnetico* della calamita. Quando fra i poli di un magnete non si ha materiale magnetico o si ha aria, si dice che la calamita è a *circuito aperto*.

§ 331. **Elettrocalamite.** — Data la grande permeabilità magnetica del ferro dolce l'intensità dei poli magnetici di un solenoide si accrescerà notevolmente introducendo in esso un cilindro di ferro dolce.

Questo è il principio sul quale sono fondate le elettrocalamite.

Le *elettrocalamite* consistono in un nucleo di ferro dolce, attorno al quale sono avvolti più strati di filo conduttore, isolato alla superficie per modo che le varie spire non si tocchino alla superficie esterna (Fig. 430 e 431).

Esse hanno, per la nota proprietà del ferro dolce di acquistare rapidamente e di perdere pure rapidamente la proprietà magnetica, l'attitudine di diventare calamite quando si lanci nell'avvolgimento loro una corrente, e di cessare di esserlo non appena si interrompa la corrente. Con esse si possono raggiungere potenze magnetiche incomparabilmente superiori a quelle delle calamite permanenti. Possono avere la forma di ferro di cavallo o la forma lineare o altra forma.

§ 332. **Galvanometri - Amperometri - Milliamperometri.** — Se il filo della esperienza di Oersted (Fig. 421) si avvolge

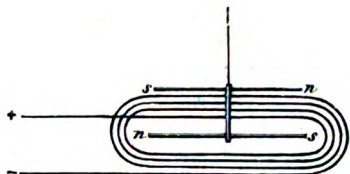



Fig. 432. - Un sistema astatico costituito da due aghi magnetici fissati assieme, ma con polarità in posizione opposta e tali quindi da rendere il loro insieme praticamente insensibile all'azione attrattiva terrestre.

Fig. 430. - Come si costituisce una elettrocalamita a ferro di cavallo.

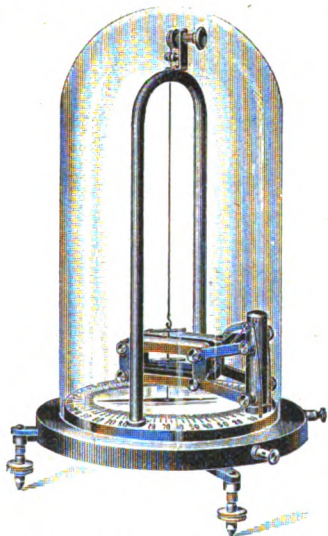



Fig. 433. - Galvanometro Nobili a sistema astatico. L'ago superiore del sistema potrebbe fungere da indice per misurare la deviazione su un quadrante graduato. Qui si fa uso di un indice non magnetizzato attaccato in basso.

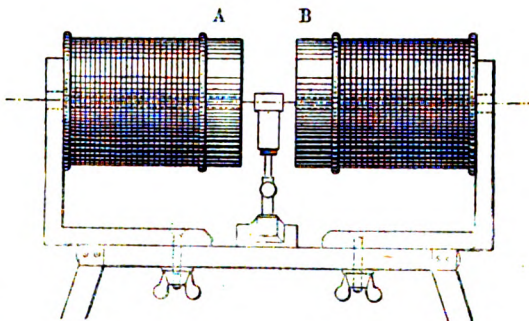



Fig. 431. - Forma frequentemente usata di elettrocalamita. I poli sono agli estremi verso l'interno dei nuclei contenuti nei rocchetti *A* e *B*. Fra essi può sostenersi un corpo da assoggettare all'azione magnetica.

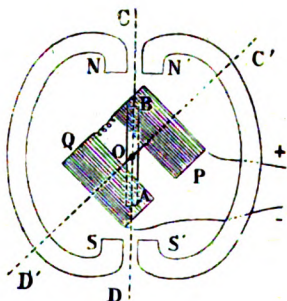



Fig. 434.

Fig. 435. - Un amperometro. Una piccola sbarra di ferro dolce *AB* mobile attaccata ad un asse perpendicolare alla sua direzione, si magnetizza perchè soggetta all'influenza di due calamite a ferro di cavallo *NS* ed *N'S'* e siccome queste fanno sentire su *AB* un'azione incomparabilmente più forte del campo magnetico terrestre, *AB* prende una direzione determinata dai poli delle calamite qualunque sia la posizione data all'apparecchio. *AB* è dentro a due rocchetti *P* e *Q* di filo corto e grosso che ha in entrambi avvolgimento in ugual senso. Facendo passare per questo filo la corrente da misurare, *AB* viene deviato e prende una posizione compresa fra *CD* e *C'D'*, tanto più prossima a *C'D'* quanto più intensa è la corrente.

All'asse di rotazione di *AB* è collegato parallelamente a questo un indice che si muove su un quadrante graduato in *amperès*. La graduazione sul quadrante si fa per confronto.

a matassa intorno all'ago, i tratti paralleli al piano dell'ago, posti al disopra e al di sotto concordano nel fissare il senso della deviazione. E quindi la deviazione dovuta ad una determinata corrente si intensifica entro certi limiti col crescere il numero degli avvolgimenti.

Per una determinata matassa e per un determinato ago, la deviazione di questo cresce al crescere dell'intensità della corrente inviata nel filo. Questo è il principio dei *galvanometri*, che sono strumenti adatti alla misura dell'intensità delle correnti (Fig. 432 e 433). Per renderli più sensibili si rende con artificio opportuno pressochè insensibile all'azione magnetica terrestre l'ago. Artificio comune è quello di cui si fa cenno nella leggenda della Fig. 432.

Più precisamente i galvanometri suindicati si dicono *galvanometri ad asse mobile* per distinguerli da quei galvanometri nei quali è mobile parzialmente il circuito percorso dalla corrente che si vuol misurare in virtù dell'azione su di questa di un magnete fisso (Fig. 434). Si chiamano questi, *galvanometri, a campo magnetico fisso.*

Per le misure di grande precisione, con correnti deboli, il sistema mobile dei galvanometri, leggerissimo, porta un piccolo specchio che riflette un raggio di luce. La deviazione dello specchio si ha dalla misura dello spostamento di un raggio luminoso riflesso dallo specchio medesimo. Tale spostamento si legge su di una scala millimetrata.

Se la graduazione dei galvanometri è fatta per modo che indichi direttamente in *ampères* l'intensità di una corrente, i galvanometri si chiamano *amperometri*, se in millesimi di *ampères* si chiamano *milliamperometri.*

§ 333. **Voltametri.** — Coi galvanometri si può misurare anche la differenza di potenziale fra due punti di un circuito che chiameremo A e B. Si collegano i due punti con un filo derivato alla quale si intercala un galvanometro a resistenza molto grande. Data questa grande resistenza, sul filo derivato passerà una parte piccolissima della corrente e le condizioni elettriche nel tratto della corrente principale compreso fra A e B non saranno sensibilmente modificate. Se E è la differenza di potenziale fra A e B, I l'intensità della corrente nel filo derivato misurato dal galvanometro, R la resistenza di questo (di fronte alla quale la resistenza del filo è trascurabile), si ha per la legge di Ohm: $E = IR$; e quindi, conoscendo R è facile dedurre dalla misura della intensità quella della differenza di potenziale.

Si costruiscono, per gli usi industriali, dei galvanometri o meglio degli amperometri (Fig. 435) graduati direttamente in *volta*. Si chiamano *voltmetri* ma meglio si chiamerebbero *voltametri*. Si distingueranno dai *voltametri* per l'elettrolisi chiamando questi *voltametri elettrolitici.*

§ 334. **Telegrafo.** — Sulle azioni magnetiche delle correnti si fonda il telegrafo, apparecchio destinato a trasmettere a distanza segnali mediante la corrente elettrica. Si vogliono inviare segnali da una stazione A (Fig. 437) ad una stazione B? Alla stazione A si dispone una pila ed un interruttore; alla stazione B si trova una elettrocalamita R inserita nel circuito della pila e munita di una armatura (Fig. 436) di ferro dolce F mantenuta da una molla antagonista ad una piccola distanza dai poli magnetici. Per mezzo dell'interruttore si possono produrre a volontà

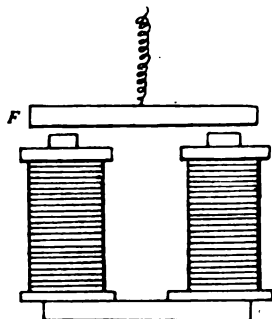
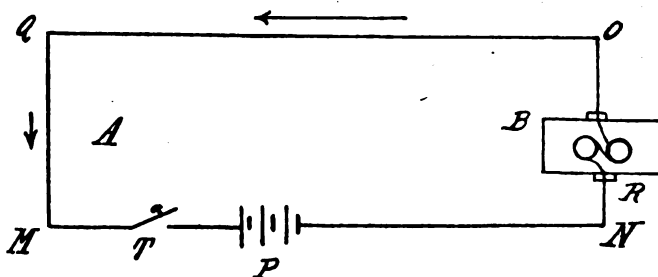



Fig. 436. Fig. 437.

dalla stazione A dei movimenti dell'armatura F situata in B, e questa mette in azione un apparecchio, variabile secondo i diversi sistemi di telegrafia, che produce dei segnali convenzionali. Questo apparecchio e l'elettrocalamita formano il ricevitore, mentre che l'interruttore, nella forma opportuna che assumerà, è il trasmettitore. Dalla figura risultano per la chiusura del circuito due tratti di filo fra le due stazioni. In pratica però non si impiega che un filo di linea: l'altro è sostituito dalla terra, che è conduttore di poca resistenza, se uno dei poli della pila ed uno degli estremi del filo della elettrocalamita sono messi in comunicazione colla terra mediante ampie lastre (Fig. 444) metalliche internate profondamente in suolo umido.

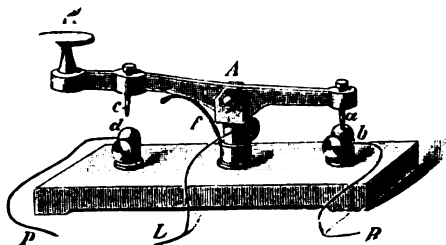



Fig. 438. - Un tasto trasmettitore Morse. Consente la trasmissione, e, se inoperoso, chiude la linea e consente il funzionamento di un ricevitore ad esso associato.

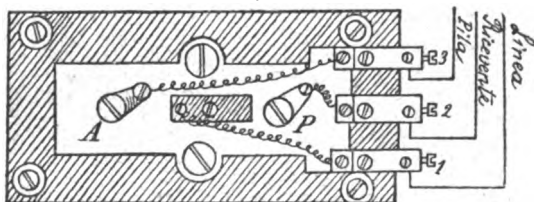



Fig. 439. - Il disotto di un tasto simile al precedente.

Siccome praticamente è necessario corrispondere nei due sensi, così ogni stazione deve possedere una pila ed un ricevitore. I dispositivi più comuni per il trasmettitore e per il ricevitore sono quelli del Morse, rappresentati dalle figure 438 a 445.

Il cenno che abbiamo dato del dispositivo Morse fa comprendere come con esso si abbia passaggio di corrente lungo la linea solamente durante gli istanti della trasmis-

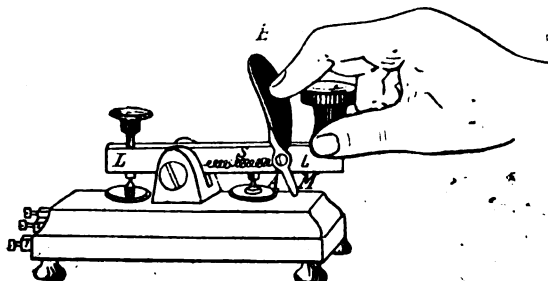
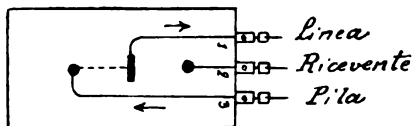



Fig. 440.

Fig. 441. - Come passa la corrente nel tasto quando questo è premuto.

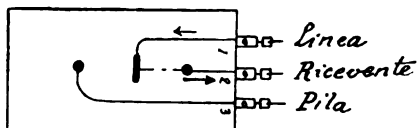



Fig. 442. - Come si chiude il circuito nel tasto quando questo è alzato.

sione dei segnali. Mentre l'apparecchio è in riposo, ed il ricevitore a cui s'è associato non funziona, nessuna corrente passa attraverso la linea.

Ebbene, è diffuso adesso largamente per i piccoli circuiti telegrafici il sistema Morse con un tasto speciale che assicura il passaggio continuo della corrente, salvo che nel periodo di trasmissione, durante il quale la corrente passa solo negli istanti di trasmissione dei segnali.

Le ragioni di tal modo di operare non possiamo qui indicarle. Solo additeremo il tasto trasmettente usato.

Si tratta di un tasto ordinario a cui è adattata (Fig. 440). una paletta di ebanite *E* mobile a leva e munita in basso di un pezzo metallico, che mette permanentemente in contatto la leva *L* del tasto colla incudinetta *A* e quindi assicura la permanenza della corrente nella linea.

Per la trasmissione ci si riporta alle condizioni ordinarie, interponendo le dita fra il pomo di ebanite del tasto e la palettina, come dimostra la Fig. 440.

Fig. 443. - Ricevitore Morse. Contiene come parte essenziale la elettrocalamita della Fig. 436, la cui àncora termina con una punta *P* che durante il passaggio della corrente preme contro ad una striscia di carta (srotolantesi da *D* per opera di un moto di orologeria) che ha al di dietro un piccolo rullo *R* imbevuto d'inchiostro. Si imprime quindi nella striscia un punto o una linea se il tasto fu premuto per un attimo o per un po' di tempo. La trasmissione si fa con un alfabeto convenzionale.

Il sistema Morse è il migliore sotto il punto di vista della semplicità

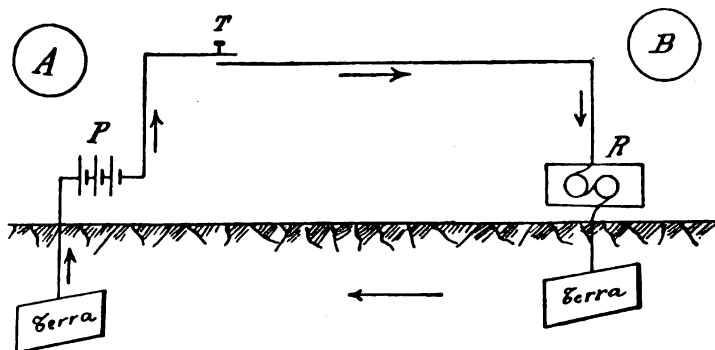



Fig. 444.

e solidità; ma non è il più rapido, perchè in media si debbono fare tre segnali per ogni lettera. Si è cercato di ottenere una lettera per ogni emissione di corrente e vi è riuscito col suo telegrafo stampante il prof. Hughes. Il meccanismo di questo sistema è complesso, e non ci accingiamo neppure a darne una idea. Il principio è semplice. Il manipolatore è una specie di tastiera che porta le lettere dell'alfabeto stampate sui suoi tasti. Il ricevitore è una ruota orizzontale portante sul suo contorno le stesse lettere in rilievo e rivestite di inchiostro grasso (ruota dei tipi). Quando si preme sul tasto del manipolatore corrispondente ad una certa lettera, una elettrocalamita preme una striscia di carta contro la ruota dei tipi e se i due apparecchi sono bene regolati rimane impressa sulla striscia di carta la lettera corrispondente al tasto premente.

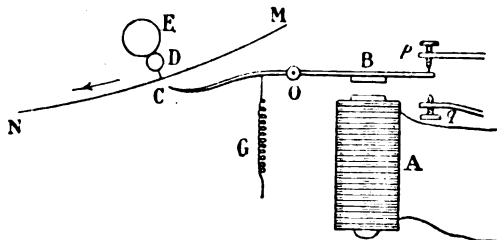



Fig. 445. - Rappresentazione del dispositivo cui si accenna nella leggenda della Fig. 443.

Così si possono trasmettere intere scritture: le porzioni di strisce sulle quali vengono impresse le lettere si tagliano, si incollano su un foglio di carta e si inviano a destinazione. Ma il sistema Hughes non essendo ancora sufficientemente rapido, l'ingegnere francese Baudot immaginò un altro dispositivo, basandosi sulla nozione che mentre un impiegato non può trasmettere lungo un filo di linea se non cinque segnali al secondo, il tempo strettamente necessario alla trasmissione di un segnale troppo esteso, è inferiore assai ad $^1/_5$ di secondo.

Non lo descriveremo certo. Avvertiamo solo come esso abbia largo uso e permetta di stampare attraverso ad un medesimo filo sei dispacci distinti nello stesso tempo che si impiegherebbe a stamparne uno solo coll'apparecchio Hughes ordinario.

I sistemi ora indicati non possono venire usati per la telegrafia attraverso ai mari ed agli oceani per ragioni varie che qui non possiamo spiegare. Diremo solamente che il filo di comunicazione è assai complesso e poggiato per la massima parte sul fondo dell'oceano e ricevere il nome di cavo. Consta di sette fili di rame torti insieme e circondati da materiale isolante, circondato esso pure da un rivestimento protettore in fili di acciaio coperti di canapa incatramata. Il ricevitore ha costituzione specialissima ideata da lord Kelvin.

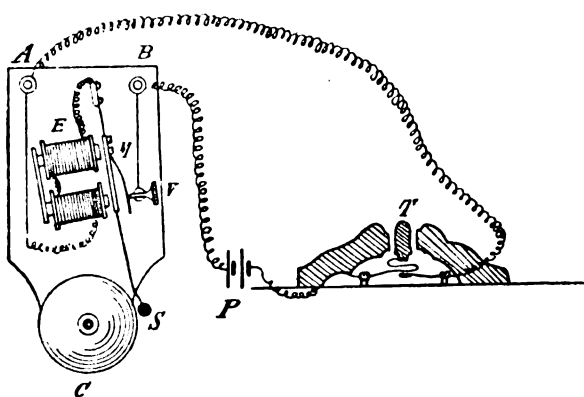



Fig. 446.

§ 335. **Il campanello elettrico.** — È un'altra applicazione della elettrocalamita rappresentata chiaramente in sezione della Fig. 446, e adoperata in impianti ben noti.

CAPITOLO XXXIII.

EFFETTI CALORIFICI E LUMINOSI DELLE CORRENTI ELETTRICHE.

§ 336. **Effetti calorifici della corrente - Legge di Joule.** — Un conduttore percorso da una corrente elettrica, per la resistenza che oppone a questa, si riscalda; tanto più quanto più forte è la resistenza e quanto più intensa è la corrente.

Le misure fatte dal fisico inglese Joule hanno dimostrato che la quantità di calore sviluppata in un circuito per ogni unità di tempo è proporzionale alla resistenza di questo ed al quadrato dell'intensità della corrente (legge di Joule). Tale legge, se con R si rappresenta la resistenza, con I la intensità della corrente, con T il tempo durante il quale passa la corrente, con Q la quantità di calore e con k un coefficiente di proporzionalità, dipendente dalle unità di misura scelte per le grandezze ora richiamate; potrà esprimersi evidentemente colla relazione:

$$Q = kI^2RT. \qquad (101)$$

La legge di Joule può anche desumersi teoricamente pensando che il valore sviluppato è una trasformazione della energia W della corrente, che, se l'intensità I della corrente si esprime in *ampère*, la differenza di potenziale E che origina la corrente si esprime in *volta* ed il tempo t si esprime in secondi, viene espressa in *joule* dalla relazione

$$W = EIT.$$

Ma se si pensa che per la legge di Ohm, $E = IR$ se R è la resistenza del conduttore espressa in *ohm*, si può anche scrivere:

$$W = I^2RT,$$

che è la relazione di Joule.

Se tale energia vogliamo esprimerla in grandi calorìe dobbiamo ricordare che il *joule* vale chilogrammetri $\frac{1}{9,87}$, che il chilogrammetro vale $\frac{1}{425}$ grandi calorìe e che quindi il *joule* vale $\frac{1}{4170}$ grandi calorìe. La quantità di calore sviluppata nel circuito per il passaggio della corrente è quindi in grandi calorìe $\frac{RI^2T}{4170}$.

In calorìe grammo sarà allora

$$Q = \frac{RI^2T}{4,17} = 0,24\ RI^2T. \qquad (102)$$

§ 337. **Emissione termica di elettroni e sua applicazione.** — Un conduttore riscaldato elettricamente o no emette degli elettroni

negativi. Tale emissione è stata, fra altro, con profitto applicata alla costruzione di tubi produttori di raggi X.

I raggi X forniti dai tubi ora ordinariamente usati hanno proprietà ben diverse secondo il grado di vuoto nel tubo; se il vuoto è mediocre, i raggi sono *molli*, cioè poco penetranti; al contrario, i tubi dove il vuoto è spinto molto lontano danno raggi *duri* o penetranti; i tubi si modificano essi stessi coll'uso e in generale, divengono di più in più duri, in seguito all'assorbimento dei gas inferiori. Esistono dispositivi di regolazione che permettono di fare rientrare dei gas in maniera di compensare questo assorbimento, ma il funzionamento ne è sempre delicato ed imperfetto.

Orbene, un fisico americano, Coolidge, è riuscito a realizzare tubi regolabili a volontà, basati sulla emissione da un catodo caldo degli elettroni necessari al bombardamento anticatodico.

Il catodo è costituito da un corpo capace di essere riscaldato elettricamente (ad es. un filamento di tungsteno o di tantalio) disposto opportunamente contro anelli o cilindri elettricamente conduttori, costituiti di preferenza con molibdeno, tungsteno, od altro metallo refrattario.

§ 338. **Valvole fusibili.** — Se il materiale costituente il conduttore è tale da fondere a temperatura non molto elevata, esso fonde interrompendo il circuito percorso dalla corrente. Su questo fatto sono fondate le così dette *valvole fusibili* che si riducono a fili o lastrine costruiti in dimensioni tali da fondere quando la intensità della corrente che li attraversa abbia raggiunta una certa intensità. Si inseriscono nei circuiti elettrici per ottenere che quando accidentalmente la intensità della corrente venga in questi a portarsi ad un valore che si avvicini a quello non più sopportabile dal circuito, la corrente venga per fusione delle valvole ad essere subito interrotta.

§ 339. **Amperometri e voltametri termici.** — La temperatura e la dilatazione di un filo percorso da una corrente per il calore da questa sviluppata, dipendono dal prodotto RI^2. Si può dunque determinare I in base alla misura della dilatazione.

Su questo principio sono fondati amperometri e voltametri termici particolarmente adatti per correnti alternate.

§ 340. **Effetti luminosi delle correnti.** — Se la resistenza del conduttore è elevata, perchè, ad esempio, esso è un filo molto sottile e il materiale che lo costituisce può sopportare temperature elevate; facendo in esso passare una corrente intensa, se ne provoca un forte riscaldamento, tale da renderlo anche incandescente.

Lampade ad incandescenza. — Su questo fatto è basata la illuminazione elettrica ad incandescenza. Essa si opera mediante lampadine consistenti in fili sottili, chiusi, per evitarne la combustione, entro bombole di vetro da cui si estrasse l'aria, e collegati cogli estremi a a due pezzi metallici esteriori che ne consentano la inserzione in un circuito elettrico. La più comune lampada ora adoperata è quella che ha un filamento sottile di carbone ottenuto per carbonizzazione di fibre vegetali, o di fili preparati facendo passare una pasta di cellulosa attraverso

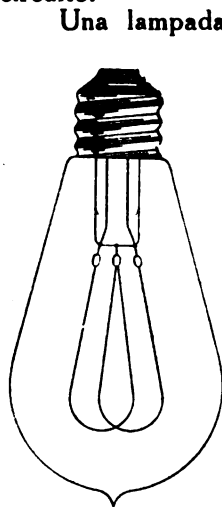
fori sottili. Le figure 447 e 448 mostrano come è costituita una lampada a carbone e come, avvitandola nel supporto, viene inserita in circuito.

Una lampada è caratterizzata dal suo voltaggio, dalla differenza di potenziale cioè che si deve fare agire ai suoi estremi e dalla intensità luminosa.

Fig. 447.

Fig. 448.

Si costruiscono lampade ad intensità luminosa la più varia da 1 a1000 candele, ma quella più usuale è da 16 candele. Se ne fabbricano per i voltaggi più svariati di 50, 65, 110, 220 ecc. *volta*.

Interessante per una lampada è l'elemento che riguarda il suo *consumo specifico*: la quantità di energia cioè che consuma nella unità di tempo per dare una candela.

Le lampade a filamento di carbone consumano in media *watt* 3,5 per candela.

Col tempo, per disaggregazione del carbone del filamento i palloncini delle lampade a filamento carbonico si anneriscono (vaporizzazione elettrica) e la luminosità efficace della lampada si attenua fortemente.

Lampade ad incandescenza che vanno sostituendo a poco a poco le lampade a carbone sono quelle a filamento metallico di osmio, di tantalio, di tungsteno ecc. Le lampade a tantalio posseggono un filamento molto lungo e molto sottile sostenuto a zig-zag su piccoli uncini (Fig. 449), al posto di quello di carbone delle lampade a carbone. Consumano *watt* 1,5 per candela e durano circa 500 ore. La lampada Z al zirconio-tungsteno consuma un *watt* per candela e fornisce una bella luce bianca che si mantiene costante per le 900 ore di durata della lampada, senza determinare un sensibile annerimento della ampolla. Sono di recente entrate in uso lampade a filamento metallico contenenti nell'ampolla un gas inerte (azoto) per limitare la evaporazione del filamento. Consumano assai meno delle precedenti ($^1/_2$ *watt* per candela se costruite per la potenza luminosa più elevata di 3000 candele).

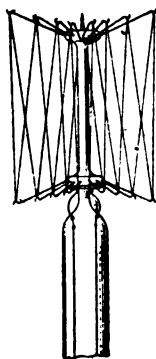
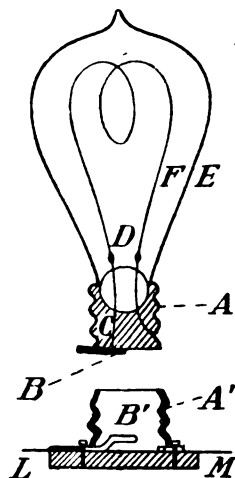



Fig. 449.

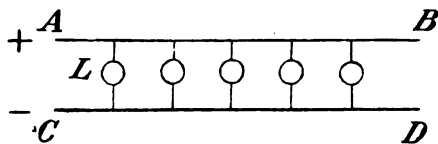



Fig. 450.

L'arco voltaico. — Altra sorgente di luce elettrica largamente usata è l'arco elettrico. Per produrre l'arco si pongono in comunicazione coi

poli di una pila elettrica conveniente, o di una opportuna sorgente di corrente, due cilindri di carbone a contatto, che dopo breve tempo si allontanano per piccolo tratto. Fra essi si manifesta allora quale ponte di comunicazione, una forte luminosità detta *arco voltaico*. Osservata in proiezione si mostra come indica la Fig. 451.

In esso corrono particelle carboniose incandescenti dal carbone positivo od anodo (quello in comunicazione col polo positivo della pila) al negativo o catodo (quello in comunicazione col polo negativo della pila). A poco a poco, quindi, nel carbone positivo si forma una cavità dalla quale, per la forte incandescenza, parte la maggior quantità dell'energia luminosa dell'arco, ed il carbone negativo si appuntisce.

Fig. 451.

Ordinariamente, quando è ben commisurata la corrente alimentatrice dell'arco alla distanza fra i carboni, l'arco è silenzioso e diffonde quella sua luce pacifica e quieta che meglio di ogni altra ci ricorda quella antica sua origine solare, comune ad ogni forma di energia messa in esercizio sulla superficie del globo.

Fig. 452. - Un regolatore per arco elettrico. Quando l'arco si allunghi e la corrente passante per esso si attenua, cresce la corrente attraverso all'elettrocalamita che abbassa il supporto del carbone *A*.

Poichè i carboni si consumano, l'arco finisce per spegnersi se la loro distanza si accresce oltre un certo limite; per conservarlo occorre quindi riavvicinare i carboni.

Così il meccanismo di utilizzazione di un arco elettrico (lampada ad arco) deve, poco dopo che si è fatta passare la corrente, allontanare i carboni inizialmente a contatto, e avvicinarli poi a mano a mano che

Fig. 453.

Fig. 454. - Altra disposizione di forno elettrico. L'arco è tenuto a posto e tranquillo da una calamita.

si consumano, pronto a portare nuovamente a contatto appena cessi di passare la corrente. In una lampada ad arco esiste perciò, oltre al sistema dei due carboni, un congegno speciale detto *regolatore* (Fig. 452).

Il funzionamento corrente di una lampada ad arco corrisponde alla spesa di 1 *watt* per candela; tuttavia, lo splendore vivissimo dell'arco necessita generalmente l'impiego di globi diffusori che abbassano questo rendimento luminoso.

§ 341. **Riscaldamento elettrico.** — Si costruiscono da parecchi anni apparecchi di riscaldamento elettrico per usi domestici il cui funzionamento lascia poco a desiderare, ma che non entrano nella pratica a causa del costo elevato del calore che con essi può aversi. Sono resistenze in forma e disposizione opportune perchè attraversate da una conveniente corrente possano irradiare intorno calore.

Ma un riscaldamento elettrico ormai largamente utilizzato nell'industria ove occorrono temperature elevate, è quello che si ha cogli archi elettrici. I forni elettrici industriali sono per gran parte ad arco. In essi vengon prodotti archi potenti dentro ambienti a pareti refrattarie ed in posizioni opportune per ottenerne gli effetti desiderati (Fig. 452 e 454).

§ 342. **Effetti Peltier e Thomson.** — Oltre al fenomeno elettrotermico descritto e chiamato *effetto Joule*, ne esiste un altro che consiste in uno sviluppo e in una scomparsa di calore rispettivamente in una e nell'altra delle due saldature di un circuito formato da due metalli quando nel circuito si faccia passare una corrente elettrica. Ne segue che si manifesta nella superficie di separazione fra i due conduttori e nelle loro parti attigue, o un aumento o rispettivamente una diminuzione di temperatura. Si attribuisce questo fenomeno alla differenza di potenziale di contatto fra i conduttori diversi. Si chiama effetto *Peltier*.

Un fenomeno simile a quello di Peltier è il fenomeno di *Thomson* che si produce, quando la corrente passa, non più da un metallo in un altro, ma da una porzione di conduttore ad un'altra aventi temperature differenti.

§ 343. **Correnti termoelettriche.** — Consideriamo un circuito formato da un cilindro di bismuto agli estremi del quale è collegata una lamina di rame (Fig. 455). L'esperienza mostra in armonia colla legge di Volta che se le due regioni di contatto sono mantenute alla stessa temperatura, il circuito non è percorso da corrente, ma se si scalda una regione di contatto o in genere le due regioni si pongono a diversa temperatura, nasce una corrente. (V. anche Fig. 456). Tale corrente si dice *termoelettrica* e l'insieme dei due metalli *coppia termoelettrica*.

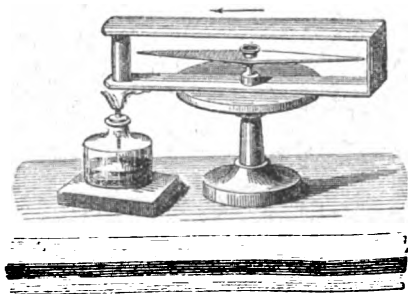



Fig. 455. - Classica esperienza di Seebeck per provare la esistenza di una corrente termoelettrica in un circuito in rame e bismuto dal quale si riscaldi una saldatura.

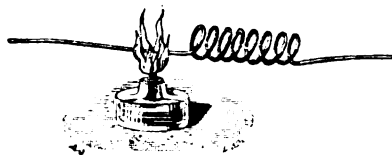



Fig. 456. - Anche il riscaldamento di un medesimo corpo in una regione ove si abbia diversa costituzione fisica, dà origine a corrente.

Il metallo verso cui si dirige la corrente attraverso al contatto caldo si dice termoelettrico *positivo*.

In proposito va notato come si verifichi la seguente legge detta dei *metalli intermediari: Se due metalli* M *ed* M′ *sono separati in un circuito da uno o più metalli intermediari mantenuti ad una medesima temperatura* t, *la forza elettromotrice è la medesima, come se i metalli fossero a diretto contatto e che questa regione di contatto fosse portata alla stessa temperatura* t. Risulta la possibilità di formare i contatti mediante saldature.

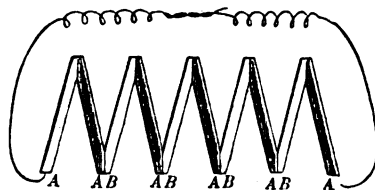



Fig. 457. - Come si può formare una pila termoelettrica. Si ha corrente scaldando le saldature *AB* mentre le altre si mantengono fredde.

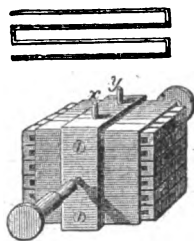



Fig. 458. - Altro modo di formare una pila termoelettrica con varie coppie. È la pila Melloni.

Se si mantiene fissa la temperatura di una saldatura e si eleva la temperatura T dell'altra progressivamente, la forza elettromotrice cresce dapprima, raggiunge un massimo, decresce e cambia segno. La temperatura θ alla quale il valore della forza elettromotrice cambia segno si chiama *temperatura di inversione*. È di circa 550° per la coppia rame-ferro se la temperatura costante della prima saldatura è di 0°.

Fig. 459. - Dispositivo Melloni per constatare deboli riscaldamenti. Una pila termoelettrica in circuito con un galvanometro dà corrente se una sua faccia si assoggetta ad un debole riscaldamento. Può bastare il calore della mano.

Le forze elettromotrici delle coppie termoelettriche sono sempre piccole. Così per l'intervallo 0°-100° quello delle coppie *ferro-rame* ha il valore di $0^v,0011152$. La coppia *bismuto-antimonio* è una di quelle la cui forza elettromotrice è relativamente grande: raggiunge $0^v,0057$ per lo stesso intervallo di temperatura.

Per formare una *pila termoelettrica* si riuniscono più coppie in successione per modo (Fig. 457, 458 e 459) che presentino i contatti di ordine pari tutti da una parte e quelli di ordine dispari dall'altra.

Se i due ordini di contatti si portano a temperature differenti, si ottiene che le forze elettromotrici delle varie coppie si sommano come nel caso della riunione in serie di più elementi voltaici.

Degna di nota è la pila termoelettrica del Melloni alla quale si accennò già alla Fig. 81, pag. 79. In essa i contatti dei due ordini si trovano

gli uni avanti agli altri sopra due piani costituenti le due facce della pila.

Le correnti termoelettriche possono servire alle misure di temperatura (Fig. 461). Certe forme speciali di pile termoelettriche si usano anche come generatori di corrente, vale a dire

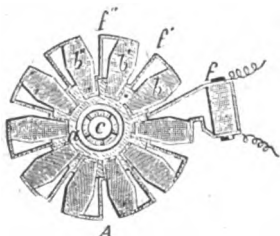



Fig. 460. - Pila del Clamond. In questa pila gli elementi, associati in serie, sono costituiti da una *lega di bismuto ed antimonio* (b, b', b''...) saldata a del *ferro* (f, f', f''...) sono disposti in corone (A) sovrapposte colle saldature dispari (a), per esempio, rivolte verso il centro; per modo che l'insieme costituisce una specie di camino che si può scaldare con una fiamma a gas. Le saldature pari, esterne sono annerite in modo da raffreddarsi all'aria e da non sorpassare la temperatura di 100° circa.

Colla pila di 120 elementi qui rappresentata si decompone facilmente l'acqua.

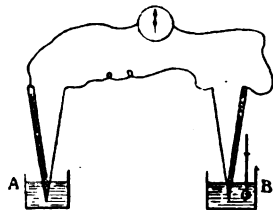
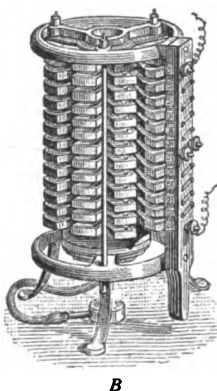



Fig. 461. - Con un circuito termoelettrico costituito da due saldature e comprendente un galvanometro si può mediante la graduazione di questo operare delle misure di temperatura. La graduazione si farà mantenendo a temperatura fissa una saldatura mentre l'altra vien portata successivamente a temperature variabili e note. Le deviazioni del galvanometro corrispondono così ad altrettante temperature che possono venir misurate adattando nel corpo o nel luogo del quale vuol conoscersi la temperatura una saldatura, mentre l'altra è mantenuta alla solita temperatura costante. Con coppie in *platino* e *platino rodiato* si possono misurare temperature sino a 1500°. Si può fare a meno di graduare il galvanometro agendo per opposizione. Si può ottenere la temperatura della saldatura A cercando a quale temperatura t occorre portare la saldatura B perchè il galvanometro rimanga a zero.

come vere e proprie pile (Fig. 460). Con una pila termoelettrica messa nel dispositivo della Fig. 385 in luogo del voltametro elettrolitico, si può agevolmente dimostrare l'esistenza dell'effetto Peltier.

— —

CAPITOLO XXXIV.

AZIONI ELETTRODINAMICHE.

§ 344. **Azione fra correnti e correnti.** — La esperienza prova in modo agevole che *due circuiti paralleli percorsi da correnti nello stesso senso si respingono mentre che si attraggono se sono percorsi da correnti di senso contrario. Due correnti ad angolo si attraggono quando hanno versi per cui sembrino convergere o dipartirsi ciascuna dal punto di incontro dei fili. Si ha repulsione invece quando il verso dell'una corrisponde all'allontanamento dal punto di incrocio e quello dell'altra all'avvicinamento.* Son dette queste, azioni elettrodinamiche.

La disposizione di Ampère (Fig. 422) permette di dimostrare le azioni fra correnti e correnti. Per le azioni manifestantisi fra correnti parallele non si ha che da avvicinare ad uno dei lati verticali AD o BC del rettangolo mobile, con direzione a questi parallela, un filo percorso da una corrente di una certa intensità mentre il rettangolo è esso pure percorso da corrente. Per le correnti ad angolo basta mettere sotto al lato inferiore DC del rettangolo mobile con direzione ad angolo un filo orizzontale percorso da corrente.

Le leggi suindicate possono riassumersi dicendo che una corrente

mobile sotto l'azione di una fissa tende a disporsi parallelamente alla fissa e collo stesso senso di questa. E si può anche dire: *Un circuito mobile e deformabile percorso da una corrente e posto nel campo magnetico creato da un'altra corrente, si sposta o si deforma sino a che il numero di linee di forza che entrano per la faccia destra del circuito mobile sia massimo.*

§ 345. **Formola di Ampère.** — Di tutte queste manifestazioni dell'azione reciproca fra due correnti ci si può render conto matematicamente partendo da una legge fondamentale enunciata da Ampère nella supposizione che si possano isolare due piccoli tratti dall'una e dall'altra corrente.

Se si considerano due piccoli tratti di circuito l per uno ed l' per l'altro, la mutua azione è espressa secondo Ampère dalla formola:

$$f = \frac{ii'll'}{r^2} \left(\cos \omega - \frac{3}{2} \cos \alpha \cos \alpha'\right) \qquad (103)$$

nella quale i ed i' rappresentano le intensità delle correnti, r la distanza fra i punti medi degli elementi l ed l', ω l'angolo che formano fra loro i due elementi, α ed α' gli angoli che questi formano, l'uno colla congiungente i punti medi, l'altro col prolungamento della congiungente.

§ 346. **Elettrodinamometri.** — L'azione delle correnti sulle correnti è applicata nella costruzione di certi strumenti di misura detti *elettrodinamometri*. Si compongono, in generale, di due rocchetti formati con filo metallico, uno fisso e l'altro mobile. Facendo passare in uno una corrente di nota intensità e nell'altro una corrente da misurare, il rocchetto mobile subisce una deviazione che è proporzionale al prodotto delle intensità delle due correnti per la legge delle azioni elettrodinamiche. Misurando tale deviazione si può avere il valore della intensità incognita.

Ordinariamente però i due rocchetti vengono entrambi percorsi dalla stessa corrente da misurare e ciò rende indifferente in qualsiasi momento il senso della corrente, giacchè se cambia per un rocchetto cambia simultaneamente anche per l'altro. La deviazione è, coll'uso della sola corrente da misurare, proporzionale al quadrato della intensità incognita. L'uso di tali elettrodinamometri è indicato per la misura della intensità efficace delle correnti alternate (§ 359).

CAPITOLO XXXV.

LE CORRENTI INDOTTE.

§ 347. **Le correnti indotte.** — Se ad un circuito metallico chiuso, quale può essere quello a cui appartiene il rocchetto più grande della Fig. 462, e contenente un galvanometro per rilevare in esso eventuali correnti elettriche, si avvicina un circuito percorso da una corrente fornita da una pila, sorge in esso circuito metallico, per la sola durata del movimento del circuito elettrico, una corrente (detta *indotta*), che ha senso contrario a quella avvicinata (detta *induttrice*).

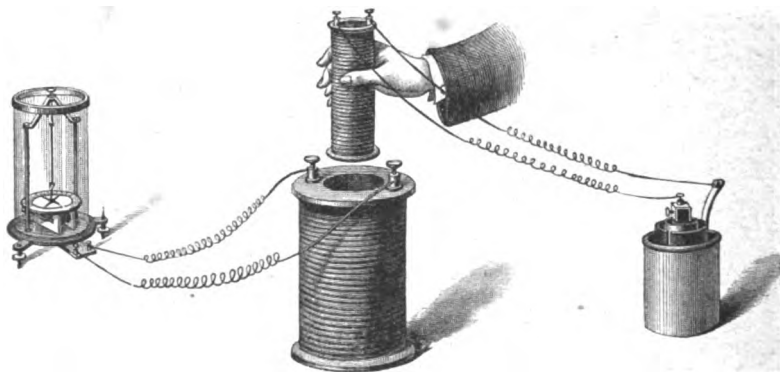
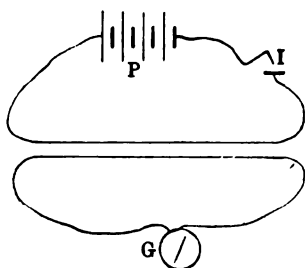



Fig. 462.

Se da un circuito metallico si allontana invece il circuito percorso da una corrente elettrica, esso circuito metallico viene attraversato per il solo periodo di tempo che dura il moto, da una corrente (detta pure indotta) che ha lo stesso senso della corrente allontanata (detta induttrice). Invece di avvicinare il circuito elettrico al circuito metallico si può con effetto equivalente, per ciò che riguarda il sorgere della corrente indotta o, come si dice, il fenomeno dell'induzione, chiudere il circuito della pila che prima fosse aperto. Del pari, invece di allontanare il circuito elettrico dal metallico, si può interrompere la corrente che attraversa il circuito elettrico (Fig. 463).

Fig. 463.

Fenomeni di induzione si avranno anche se, fissi i due circuiti, verrà a variare l'intensità della corrente che ne percorre uno. Di senso contrario a quello della corrente variabile sarà la corrente indotta se la prima cresce, dello stesso senso se diminuisce.

Similmente ci si possono attendere fenomeni di induzione avvicinando od allontanando da un circuito metallico il polo di una calamita, giacchè, come abbiamo detto, una corrente elettrica equivale, per gli effetti magnetici che può generare, ad una corrente; e qui tutto fa credere che ogni azione si debba al campo magnetico della corrente che si sposta o che si fa variare di intensità. La esperienza conferma la previsione.

Fig. 464. - Correnti indotte che sorgono in un circuito metallico (rappresentato con linee punteggiate) avvicinando od allontanando uno dei due poli magnetici di una calamita, del quale è indicato il campo magnetico circostante mediante le linee di forza rispettive.

Poichè in ogni caso di varia-

zione del flusso di forza magnetica attraversante un circuito metallico nasce in questo una corrente indotta, mentre che lo spostarsi di un circuito in un campo magnetico non dà origine a corrente indotta se il flusso magnetico che attraversa il circuito non varia; in generale si può dire che nasce sempre una corrente indotta in un circuito quando venga a variare il campo magnetico abbracciato dal circuito. La corrente dura finchè dura la variazione del flusso.

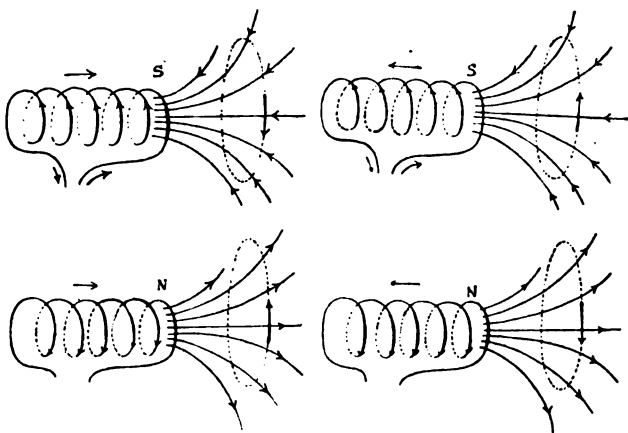



Fig. 465. - Correnti indotte dovute all'avvicinamento ed all'allontanamento da un circuito metallico degli estremi di un solenoide percorso da corrente. I casi sono perfettamente analoghi a quelli considerati nella figura antecedente.

§ 348. **La regola di Lenz.** — Colle nozioni relative alle azioni fra correnti e correnti si può facilmente intendere una legge o regola, chiamata *legge di Lenz*, la quale permette di prevedere la direzione della corrente indotta quando questa sia ottenuta per mezzo di un moto relativo fra circuito e corrente. Essa può poi estendersi agli altri casi.

Questa regola è la seguente: *la direzione della corrente indotta è sempre tale, che l'azione elettrodinamica manifestantesi fra essa e la corrente induttrice, tende ad opporsi al movimento che l'ha generata.*

Così, per esempio, siccome due circuiti paralleli percorsi da correnti di direzioni opposte si respingono, la corrente indotta dovrà essere di senso opposto alla inducente allorchè l'induzione è dovuta all'avvicinamento reciproco dei due circuiti. Analogamente si avrà, che le correnti indotte ottenute coll'aumento d'intensità o colla chiusura della corrente induttrice, sono dirette in senso opposto alla corrente induttrice medesima. Nei casi opposti la corrente indotta, invece di essere *inversa* è *diretta*, cioè colla stessa direzione dell'induttrice.

Se si tien conto del modo di surrogare una corrente elettrica con una calamita e viceversa, la legge di Lenz si potrà applicare anche al caso di una corrente indotta dovuta al moto relativo fra un circuito ed un sistema magnetico.

§ 349. **Altre regole mnemoniche.** — Meglio valgono queste altre regole mnemoniche. Supponendo che si sposti il circuito metallico rispetto al campo magnetico, la direzione della corrente si determina colla seguente regola pratica:

Si dispongano le tre prime dita della mano destra perpendicolarmente fra di loro: coll'indice si punti nella direzione e nel senso delle linee di forza e si volga il pollice nel senso in cui si muove il circuito; il medio sarà allora diretto nel senso della corrente indotta.

Considerando la variazione del flusso magnetico, si può applicare la seguente regola: Se il flusso magnetico diminuisce nel circuito elettrico, la corrente è diretta nel senso in cui ruota un cavatappi che avanzi nella direzione delle linee di forza.

§ 350. **Leggi del Felici.** — Il fisico italiano Riccardo Felici enunciava le *leggi quantitative dell'induzione* dicendo, che la quantità di elettricità, messa in moto per induzione, è proporzionale alla variazione del flusso di forza magnetica passante entro il circuito indotto, divisa per la resistenza di questo. L'intensità della corrente indotta sarà allora proporzionale alla *velocità* con cui varia quel flusso, divisa per la resistenza, e la forza elettromotrice alla quale si potrà attribuire tale corrente sarà proporzionale alla detta velocità.

Scegliendo opportunamente l'unità di misura del flusso magnetico potremo, in base alla legge del Felici già enunciata, dire che la forza elettromotrice media che si ha nel piccolo tempo t' compreso fra l'istante t e l'istante $t+t'$, è uguale al flusso che si aveva all'istante t meno il flusso all'istante $t+t'$, tutto diviso per il tempuscolo t'. Indicando detti due flussi rispettivamente con le notazioni Φ e Φ', si potrà scrivere:

$$E_\mu = \frac{\Phi - \Phi'}{t'}, \qquad (104)$$

ove E_μ rappresenta la f. e. m. media fra t e t'; e la forza elettromotrice istantanea all'istante t sarà il limite di questo rapporto per t' tendente a zero.

§ 351. **Autoinduzione - Coefficente di autoinduzione.** — Va notato, che, per quanto si è detto sull'induzione dovrà prodursi induzione in un circuito percorso da corrente quando varii l'intensità di questa per una ragione qualsiasi. Il campo magnetico variabile così ottenuto determinerà la produzione di una forza elettromotrice d'induzione nel circuito stesso, la quale tenderà a produrre una corrente dello stesso senso della preesistente, se questa decresce e di senso contrario nel caso inverso. L'induzione d'un circuito sopra sè stesso si chiama *autoinduzione* e manifestamente ha per effetto di attenuare le variazioni di intensità della corrente nel circuito. Ciò può paragonarsi all'effetto dell'inerzia posseduta da un corpo in moto, in virtù della quale sono attenuate le brusche variazioni di velocità; i volanti dei motori industriali agiscono appunto in virtù della loro inerzia.

La forza elettromotrice d'autoinduzione ad un dato istante è pro-

Fig. 466. - Disposizione del Faraday per dimostrare sperimentalmente l'*estracorrente di apertura* e l'*estracorrente di chiusura*. Una derivazione comprendente un galvanometro G, è posta fra la pila ed il rocchetto AB; un tasto di corrente permette di chiudere o di interrompere il circuito.

α) Sia ab la posizione d'equilibrio dell'ago del galvanometro sotto l'azione della corrente che percorre la derivazione quando il circuito è chiuso; si conduce artificialmente l'ago in ab e ve lo si trattiene con un tappo, impedendogli di ritornare a zero; quando si stabilisce la corrente l'ago è spinto al di là di ab in conseguenza di una estracorrente che circola in senso contrario della corrente principale nel rocchetto, e nello stesso senso nella derivazione.

β) Essendo stabilita la corrente si mantiene l'ago a zero (posizione cd) malgrado il passaggio della corrente mediante un tappo; nell'istante in cui si rompe il circuito, l'ago è lanciato in senso inverso al precedente dall'estracorrente che circola ora nello stesso senso della primaria nel rocchetto ed in senso contrario nella derivazione e quindi nel galvanometro.

porzionale alla *velocità* con cui nell'istante considerato varia l'intensità della corrente, come pure ad un coefficiente caratteristico del conduttore, che ha ricevuto il nome di autoinduzione o meglio di *coefficiente di autoinduzione*, il quale dipende dalla forma del circuito. Piccolo se il circuito è rettilineo, può assumere valori elevati nel caso di un circuito avvolto a spirale o ad elica tanto più quanto più numerose saranno le spire di questa. Ritorna minimo se l'elica è doppia, ed uno dei rami serve di ritorno alla corrente che arriva per l'altro.

Siccome si sa che il flusso abbracciato da un circuito elettrico è proporzionale alla intensità della corrente che circola in esso, lo si può scrivere uguale ad un certo coefficiente L moltiplicato per l'intensità della corrente, ossia si può scrivere:

$$\Phi = LI. \qquad (105)$$

Questo coefficente L, che rappresenta il flusso che un dato circuito lancia attraverso sè stesso quando è percorso da una corrente uguale ad 1, è il suindicato *coefficiente di autoinduzione*.

La corrente dovuta al fenomeno di autoinduzione si suol chiamare *estracorrente*. Siccome è *inversa*, cioè di direzione opposta alla corrente principale, quando questa sta aumentando d'intensità, e *diretta* nel caso opposto; quando si chiude il circuito di una pila, si produrrà una estracorrente inversa, mentre si produrrà una estracorrente diretta durante il periodo variabile di cessazione della corrente per interruzione del circuito.

Una manifestazione evidente di autoinduzione è la scintilla brillante che si ha nella regione di interruzione di un circuito percorso da corrente, tanto più manifesta quanto più elevata è l'autoinduzione del circuito.

Fig. 468.

§ 352. **Induzione in masse metalliche - Unità di coeff. di autoinduzione.** Non è soltanto in un conduttore filiforme chiuso su sè stesso, che si produce il fenomeno della induzione. In un filo metallico aperto sorgerà una forza elettromotrice agli estremi. Ed un qualunque conduttore massiccio diventa sede nella sua massa di correnti indotte, quando varia il campo magnetico, nel quale il conduttore è collocato.

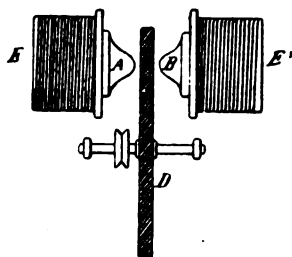
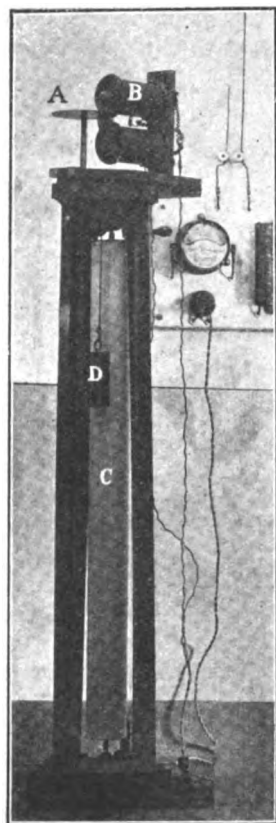



Fig. 467.

Anche queste correnti obbediscono alla legge di Lenz; si chiamano correnti di Foucault, riscaldano il conduttore e danno ragione di certi fatti quali i notissimi feno-

meni detti di magnetismo di rotazione, per cui un disco metallico (di rame ad es.) orizzontale capace di ruotare intorno ad un asse verticale passante per il suo centro, vien messo in rotazione da una calamita che venga fatta ruotare intorno al medesimo asse perpendicolare al suo asse magnetico nel punto medio, e per cui si può far ruotare una calamita per effetto della rotazione al disco (esperienze classiche di Arago). Se nel disco si praticano tagli radiali rendendo difficile la produzione delle correnti di Foucault, i fatti suindicati o non si producono o si producono con difficoltà.

Analogamente, in virtù delle correnti di Foucault, un disco di rame in rapida rotazione fra i poli di una potente elettrocalamita si ferma eccitando questa. Tale è il caso del disco di rame *D* della Fig. 467 o del disco orizzontale *A* di rame sostituito al noto molinello della macchina del Morin nella Fig. 468. Fermare il disco in questo apparecchio significa arrestare il moto di caduta del peso motore *D*. Invece di arrestare il moto lo si può rendere uniforme commisurando opportunamente la corrente eccitatrice della elettrocalamita.

Unità di coefficiente di autoinduzione è l'*Henry* e corrisponde all'autoinduzione di un circuito nel quale sorge la forza elettromotrice di un *volta* per la variazione di un *ampère* al secondo nella intensità della corrente.

§ 353. **Telefono.** — Premesse queste poche considerazioni sulle correnti indotte, possiamo intendere la costituzione ed il funzionamento del telefono.

Il telefono, quale fu presentato in America da Graham Bell, sebbene ideato dall'italiano Antonio Meucci, si compone di una lamina di ferro *F* (Fig. 470), dietro alla quale è fissata una calamita *AB*. Attorno ad uno dei poli, *A* ad es., è disposto un rocchettino di filo metallico coperto di seta. Le due estremità di questo filo sono collegate mediante due fili di linea ad un apparecchio identico, posto là dove si trova la persona colla quale si desidera parlare.

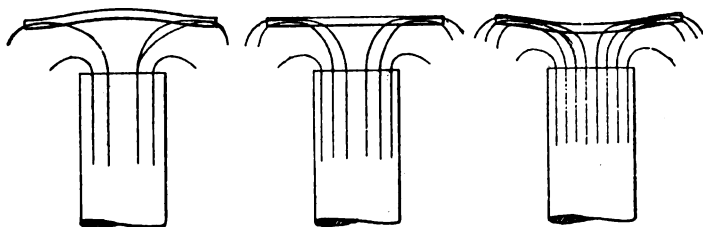



Fig. 469.

Quella delle due persone che prende prima la parola, avvicina alla sua bocca la lamina di un telefono che funge da trasmettitore. L'altra colloca un altro apparecchio, funzionante da ricevitore, all'orecchio.

Le impulsioni comunicate dalla voce alla lamina di ferro del trasmettitore, determinano una successione di riavvicinamenti e di allontanamenti alternativi della lamina rispetto alla calamita e conseguenti modificazioni (Fig. 469) del campo magnetico della calamita, che originano correnti indotte nel filo di linea. Queste correnti, traversando il rocchetto del ricevitore, aumentano o diminuiscono alternativamente il magnetismo della corrispondente calamita, e fanno variare l'azione sulla laminetta di ferro, così da imprimere a questa le stesse vibrazioni impresse dalla voce alla laminetta dell'apparecchio trasmettitore.

L'aria in contatto colla laminetta è per tal modo messa in vibrazione così da ripetere all'orecchio di chi ascolta i suoni emessi dinanzi al trasmettitore.

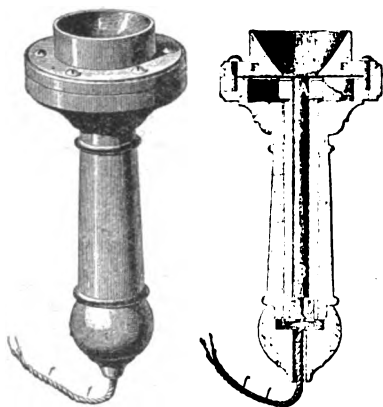
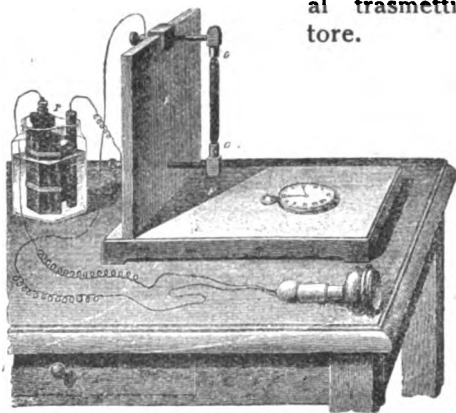



Fig. 470. Fig. 471.

§ 354. **Il microfono.** — Fino dal 1876 si stabilirono comunicazioni telefoniche col descritto telefono magnetico usato come trasmettitore e come ricevitore. Ma la portata loro si trovò ridotta a distanze di qualche chilometro solamente. Fortunatamente una scoperta fatta da Hugues fornì un organismo trasmettitore di gran lunga più potente del trasmettitore magnetico.

Due piccoli pezzi di carbone conduttore sono fissati ad una assicella di legno (Fig. 471). Fra essi è posto una specie di lapis di carbone con due punte estreme le quali sono ricevute entro due cavità di quelli, per modo da appoggiarvisi leggermente. Se si fa passare nell'apparecchio descritto, che fu detto il *microfono*, la corrente di una pila, il cui circuito comprende anche il rocchetto di un telefono posto a distanza; si può trasmetter la parola facendo esercitare l'ufficio di trasmettitore al microfono ed al telefono quello di ricevitore. Appena si produce un suono in vicinanza del microfono, le vibrazioni sonore bastano a modificare i contatti del lapis coi suoi supporti; ne risultano variazioni di pressione ai punti di contatto e conseguentemente variazioni di resistenza. La corrente della pila prova delle variazioni corrispondenti di intensità che modificano il magnetismo della calamita del telefono e che mettono così la sua laminetta di ferro in vibrazione. Il microfono descritto ha una grande sensibilità, ma nella pratica si è trovato conveniente renderlo multiplo formando delle *serie* con *batterie* di carboni fusiformi; realizzando i così detti microfoni *lapis*. Si usano frequentemente nella pratica microfoni detti *a polvere* perchè costituiti da piccoli granuli di carbone contenuti in massa più o meno compatta entro una scatoletta di forma conveniente le cui basi superiore ed inferiore hanno l'ufficio dei carboni OO' nel microfono semplice. In questi microfoni funzionano i numerosi contatti fra granello e granello.

§ 355. **Trasmissione a distanza.** — Il semplice dispositivo costituito da un microfono trasmettitore e da un ricevitore telefonico ad induzione collegati direttamente alla linea di trasmissione non serve per

trasmissioni a distanze apprezzabili. Occorre che la resistenza totale del circuito al quale appartiene il microfono, sia piccola. Si ricorre perciò all'artificio seguente ideato da Edison. Alla stazione trasmettente, costituiscono un circuito di piccola resistenza, il microfono, una pila, un rocchetto di filo conduttore. Parallelamente alle spire di questo rocchetto stanno le spire di un altro rocchetto collegato al filo di trasmissione o di linea. In questo modo il circuito del microfono pel quale è soddisfatta la condizione di piccola resistenza totale, agisce per induzione

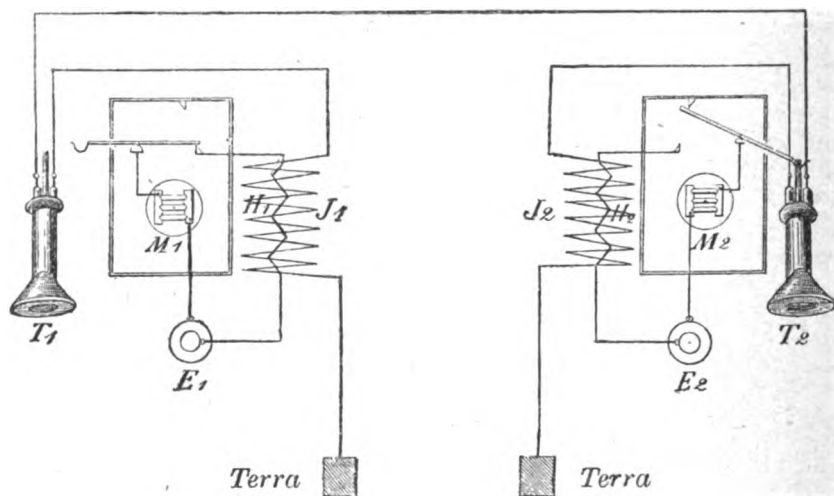



Fig. 472. - Schema di un semplice impianto telefonico. Risulta un po' più complesso del semplice impianto descritto nel testo. In E_1 ed E_2 sono due pile. M_1 ed M_2 sono due microfoni. T_1 e T_2 due telefoni. H_1 ed J_1, H_2 ed J_2 sono due coppie di rocchetti indipendenti, fra i quali si hanno, durante la conversazione, effetti di induzione.

sul filo di linea e rende possibile la recessione. Anche il ricevitore telefonico non è in serie col filo di linea ma possiede un circuito proprio con rocchetto avente le spire parallele a quelle di un rocchetto appartenente al circuito di linea. I rocchetti del filo di linea sono formati con spire di filo sottile rispetto al filo costituente i rocchetti del circuito microfonico e del circuito contenente il ricevitore telefonico.

In un impianto telefonico anche modesto ad ognuna delle due stazioni fra le quali si vuole effettuare la comunicazione, occorre che vi sia tanto l'apparecchio trasmettitore come quello ricevente. La Fig. 472 dà uno schema di impianto semplice soddisfacente a queste esigenze.

§ 356. **Altre applicazioni dell'induzione.** — Sui fenomeni di induzione sono basate molte macchine industriali, delle quali ci occuperemo nei capitoli seguenti.

CAPITOLO XXXVI.

LE CORRENTI ALTERNATIVE - ALTERNATORI.

§ 357. **Correnti alternative.** — Si abbia una calamita piegata coi poli affacciati e molto estesi, cosicchè nello spazio tra questi interposto si abbia un campo magnetico sensibilmente uniforme. S' immagini poi un circuito chiuso a telaio disposto col suo piano perpendicolarmente alla direzione del campo, attraversato quindi dal massimo flusso di forza. (La misura di un flusso come è noto è data dal prodotto della componente normale della forza magnetica per l'area del rettangolo, di cui il circuito forma il perimetro). La Fig. 473 rappresenta gli elementi costitutivi della indicata disposizione, ma non superfici polari ampie come abbiamo supposte, ciò per chiarezza di rappresentazione.

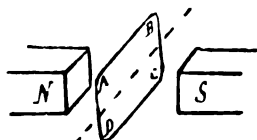



Fig. 473.

Se questo circuito viene mosso parallelamente a sè stesso, in modo che il suo piano si conservi perpendicolare alle linee di forza, il flusso che lo attraversa non varierà, e perciò non nascerà in esso alcuna corrente indotta.

Se invece lo si fa ruotare intorno ad un asse appartenente al suo piano e parallelo per esempio ai suoi lati maggiori, in modo che dopo un quarto di giro il suo piano, da perpendicolare che era, divenga parallelo alle linee di forza, nella nuova posizione, il flusso di forza che attraversa il circuito, sarà nullo, perchè è nulla la componente della forza normale al piano del circuito. Dunque, durante la rotazione il flusso di forza ha diminuito sino a zero, nel circuito sarà nata una forza elettromotrice ed il circuito sarà stato percorso da una corrente indotta, costituita da una quantità di elettricità proporzionale al rapporto fra la variazione avvenuta nel flusso di forza e la resistenza del circuito. Continuando nella rotazione del circuito per un altro quarto di giro, il flusso di forza, che lo attraversa, crescerà di nuovo da zero sino al valore primitivo, e quindi il circuito stesso sarà diventato sede di una forza elettromotrice indotta che lo avrà fatto percorrere ancora da una corrente.

Sebbene dovuta ad aumento, anzichè a diminuzione del flusso di forza, questa corrente ha la stessa direzione della precedente perchè il circuito ha invertita la sua posizione rispetto alla direzione del campo, e può considerarsi tale corrente una continuazione della precedente. Siccome poi il flusso di forza varia colla maggior rapidità, quando il piano del circuito passa per la posizione in cui è parallelo alle linee di forza, così la forza elettromotrice della corrente indotta sarà andata crescendo sino ad un massimo nel primo quarto di rotazione per decrescere sino a zero durante il secondo quarto.

Completando la rotazione si avrà durante il successivo mezzo giro una nuova corrente indotta di senso opposto a quello della precedente ma di intensità crescente sino ad un massimo uguale a quello della precedente e poi decrescente sino a zero.

Continuando uniformemente nella rotazione si ha in sostanza nel filo una corrente che cambia alternativamente di segno, tanto più rapidamente quanto più rapida sarà la rotazione del telaio. La corrente che per tal modo si ottiene viene detta corrente *alternativa* od anche corrente *alternata*. Il numero delle inversioni della corrente per ogni unità di tempo si chiama *frequenza della corrente.*

Se la rotazione è uniforme, l'intensità della corrente viene a variare col tempo, precisamente come varia la velocità di un pendolo che oscilla. La legge di variazione essendo la stessa nei due casi, si potrà parlare di *ampiezza* della corrente alternativa (valore massimo della intensità) e di *periodo* della corrente (intervallo di tempo che separa due valori uguali e dello stesso senso della intensità), come si parla di ampiezza o di periodo di una oscillazione pendolare. La si può rappresentare con un diagramma come mostra la Fig. 475. Lungo l'asse OX si rappresentano i tempi e lungo l'asse OY le intensità. Da O a B si rappresentano tutte le vicende della corrente per il corso di un periodo, vale a dire, se ci si riferisce al caso del telaio, per il corso di un'intera rotazione.

Quando si dovrà parlare di due correnti di ugual periodo che non si annullano e non raggiungono i loro valori massimi, nei medesimi istanti si dirà che esse presentano una *differenza di fase.* Se una delle correnti ha il valore zero mentre l'altra ha raggiunto già il valore massimo, si dirà che esse presentano una differenza di fase di un quarto di periodo (Fig. 476). Si considerano, come vedremo, frequentemente correnti alternate presentanti una differenza di fase di un terzo di periodo.

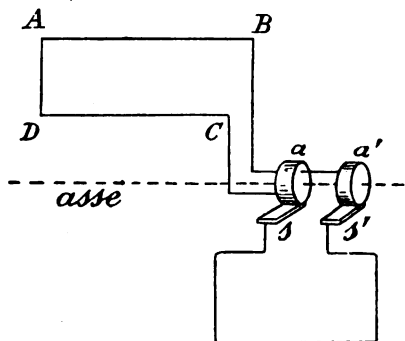



Fig. 474.

Gli estremi del filo del telaio più sopra considerato o di un telaio che si comporti come quello, si possono fare arrivare a due anelli metallici a, a' (Fig. 474) che ruotino col telaio ed i cui assi coincidano con quello di rotazione del telaio medesimo. Contro questi anelli si possono adattare due molle o *spazzole* s ed s' che comunichino con due *serrafili.* Si avrà allora un apparecchio capace di generare una forza elettromotrice alternata come la pila dà ai suoi poli una forza elettromotrice costante. I *poli* del generatore saranno i due serrafili nominati, e se si vuole che una corrente alternata ottenibile dalla indicata forza elettromotrice, passi attraverso un determinato filo, non si avrà che a collegare gli estremi di

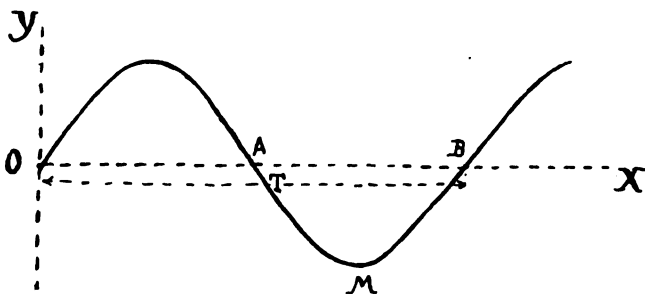



Fig. 475.

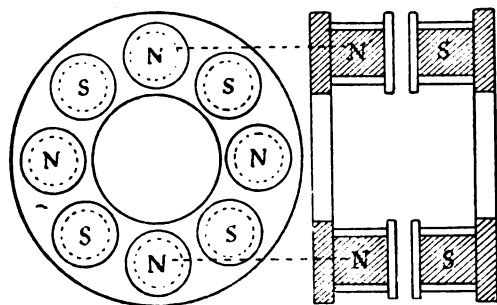
questo coi serrafili del generatore.

Fig. 476.

§ 358. **Alternatori o dinamo per correnti alternate.** — Se si pensa che il semplice circuito considerato sia sostituito da un circuito più complesso, e che il campo magnetico della calamita sia sostituito da un potente campo magnetico prodotto da elettro-calamite convenientemente eccitate; si passa dal caso semplice e rudimentale considerato ai moderni *alternatori* detti anche *dinamo* per correnti alternate, giacchè può chiamarsi in generale *dinamo una qualunque macchina od apparecchio che serva alla produzione di corrente elettrica per via di movimento a mezzo dell' induzione.*

Nella pratica, per la generazione delle correnti alternate di uso ormai tanto frequente, si hanno di tali grandi macchine distinguibili in due parti, detta l'una *indotto* e l'altra *induttore*; l'indotto e l'induttore assumono però in esse forme di una grande complessità apparente, che neppure lontanamente a prima vista farebbero pensare al semplice organismo da noi descritto come il rudimento delle macchine medesime.

Fig. 477.

Una forma comune di induttore è quella formata da due corone di poli alternati, situate di fronte l'una all'altra coi poli opposti in prospetto come mostra la Fig. 477. Ad un induttore siffatto si fa corrispondere, come mostra la Fig. 478, un *indotto* cosidetto *a disco*, costituito da una successione di avvolgimenti in serie fra loro, ma formati con direzione opposta. Esso si fa ruotare fra due corone di poli. Con tale moltiplicità di poli si ottiene una frequenza assai elevata per la corrente che si produce senza bisogno di grande velocità di rotazione per l'indotto. Fra il numero p delle coppie di poli dell'alternatore, il numero N dei giri che fa al minuto primo e la frequenza f della corrente prodotta esiste la relazione

$$f = \frac{Np}{60}. \qquad (106)$$

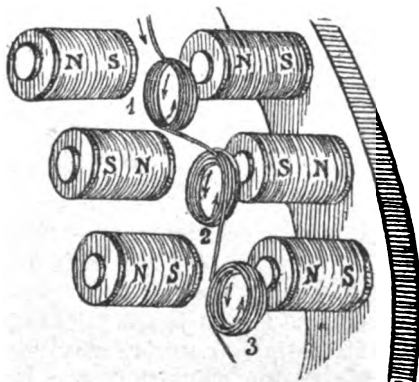



Fig. 478.

§ 359. **Valori istantanei, medi ed efficaci.** — È chiaro che per le grandezze alternative considerate, intensità di corrente e forza elettromotrice, si dovrà considerare spesso il cosidetto *valore istantaneo* in un determinato istante t. Lo si rappresenterà rispettivamente con I_t ed E_t. Siffatta considerazione si fece già pei successivi istanti nell'indicare la variazione col tempo, sia della intensità della corrente generata, sia della forza elettromotrice cui possa attribuirsi la corrente medesima, mentre il telaio della Fig. 473 ruota uniformemente nel campo magnetico.

Ma oltre al valore istantaneo accade di dover considerare il *valore medio* ed il valore *efficace* nonchè il *valore massimo*, che è il più elevato valore assoluto raggiungibile della grandezza alternativa, intensità di corrente o forza elettromotrice.

Per *valore medio* si intende la media dei valori di ugual segno per un semiperiodo. Lo si rappresenterà rispettivamente, per la intensità di corrente e per la forza elettromotrice, con I_m ed E_m. Si dimostra agevolmente che:

$$(107) \qquad I_m = \frac{2}{\pi} I \text{ ed } E_m = \frac{2}{\pi} E; \qquad (108)$$

ove I ed E sono i valori massimi della intensità e della f. e. m.

Intendiamoci ora sul *valore efficace.*

Quando si tratta di correnti alternative la legge fondamentale di Ohm non si applica che in un intervallo di tempo pressochè istantaneo così breve cioè da poter ritenere quelle correnti come costanti. Ciò dipende dal fatto che l'intensità e la forza elettromotrice per le correnti alternative sono variabili da istante ad istante, e risultano da queste variazioni degli effetti parassiti di autoinduzione. Per scrivere la legge di Ohm bisogna tener conto di tale effetto in modo come sommariamente si dirà nel § 360.

Ma non è la stessa cosa per la legge di Joule $Q = KRI^2t$, che resta applicabile. Si potrà quindi paragonare una corrente alternativa ed una corrente continua che dia attraverso ad uno stesso conduttore e durante il medesimo tempo un medesimo effetto di riscaldamento Joule. La formola stessa di Joule suggerisce di considerare per una corrente alternativa (a definire la corrente continua che la equivalga) la radice quadrata della media dei quadrati della intensità durante un periodo. Quest'ultimo valore si chiama *intensità efficace* della corrente alternativa.

Analogamente si chiama *forza etettromotrice efficace* la radice quadrata della media dei quadrati della forza elettromotrice durante un periodo.

Si può dimostrare che fra i valori efficaci e quelli massimi, esistono le relazioni:

$$(109) \qquad I_{eff} = \frac{I}{\sqrt{2}} \quad ; \quad E_{eff} = \frac{E}{\sqrt{2}}. \qquad (110)$$

§ 360. **Impedenza.** — Rappresentando con ω la velocità angolare di rotazione del telaio della Fig. 473 nel quale viene a generarsi la corrente alternativa o in genere (ciò che equivale) per una qualsiasi corrente alternativa, il rapporto fra la quantità costante 2π e il periodo T della corrente medesima; si riesce a trovare, con ragionamento che non riferiremo, che fra i valori massimi della intensità della

corrente a quello della forza elettromotrice esiste la seguente relazione:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2 L^2}{T^2}}}, \qquad (111)$$

nella quale L rappresenta il coefficiente di autoinduzione del circuito e T il periodo. Questa formola rappresenta in certo modo una estensione della legge di Ohm alle correnti alternative se il denominatore del secondo membro si considera rappresentare una resistenza. Tale denominatore $\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$, che tiene il posto della resistenza della formola di Ohm, si chiama *impedenza*. È la resistenza che si deve considerare nelle correnti alternate e che è diversa da quella resistenza già da noi considerata per le correnti continue e che può dirsi *ohmica*. Se si confronta la precedente formola con quella della legge di Ohm $I = \frac{E}{R}$ si vede che l'autoinduzione opera come se la resistenza del circuito fosse aumentata in modo da avere il valore di $\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ maggiore di quello di R e quindi l'intensità diminuisce, tanto più quanto più grande è l'autoinduzione, è, fissa questa, quanto più grande è la velocità di rotazione ω. Si potrebbe dimostrare che l'impedenza non agisce come una semplice resistenza, ma ha anche l'effetto di ritardare di fase la intensità della corrente I rispetto alla f. e. m. E.

§ 361. **Potenza di una corrente alternata.** — La potenza di una corrente continua è misurata in *watt* dal prodotto della forza elettromotrice per la intensità espressa rispettivamente in *volta* ed in *ampères*. Per il caso di una corrente alternata tale potenza è misurata in *watt* dal prodotto della forza elettromotrice efficace in *volta* per la intensità efficace in *ampères* e per un fattore, detto *fattore di potenza*, il cui valore non può superare l'unità e generalmente ne è minore. Tale fattore di potenza dipende dalle condizioni del circuito.

§ 362. **Campo magnetico alternativo.** — Se attraverso ad un avvolgimento abbracciante una certa area si fa passare una corrente alternativa si crea per parte di questa un campo magnetico, che, a meno di influenze che potremo qui trascurare, sarà in ogni istante quello che produrrebbe una corrente continua avente l'intensità della corrente circolante in quell'istante. Tale campo si potrà ritenere, dentro una certa regione, uniforme; avrà cioè in ogni punto la stessa direzione e la stessa intensità. Mentre la direzione rimarrà sempre costante, fisso che sia l'avvolgimento, la intensità cambierà successivamente ad ogni istante secondo le vicende stesse dell'intensità della corrente alternativa assumendo un massimo con un certo senso in corrispondenza del valore massimo in un determinato senso della corrente, il valore zero in corrispondenza del valore zero per l'intensità della corrente, un massimo in senso contrario al precedente in corrispondenza del valore massimo in senso contrario al precedente per la corrente.

Un campo magnetico siffatto si chiamerà alternativo od oscillatorio.

———

CAPITOLO XXXVII.

MOTORI E DINAMO A CORRENTE CONTINUA
MOTORI A CORRENTE ALTERNATA.

363. **Macchine dinamo elettriche a corrente continua.** — Colla rotazione di un rettangolo di filo conduttore fra i poli di una calamita o di una elettrocalamita, si può avere, se si vuole, una corrente continua invece di una corrente alternata quale è rappresentata dal diagramma *OABCD* della Fig. 480. Basta che gli estremi dei fili del telaio comunichino non con due anelli interi, ma con due pezzi *a* ed *a'* diametralmente opposti fissi sull'albero di rotazione e che questi pezzi scorrano fra due molle *s*, *s'*, diametralmente opposte, dalle quali si raccoglie la corrente (Fig. 479). Tali due pezzi costituiscono un congegno detto *commutatore* il quale è così fatto, che si invertono le comunicazioni fra il tratto di circuito girante ed il tratto fisso, nell'istante preciso in cui nel primo la corrente indotta s'inverte. In tal maniera nel circuito esterno si raccoglierà una corrente di direzione costante sebbene non costante di intensità giacchè graficamente tale intensità viene rappresentata dalla curva *OA'B'C'D'* della Fig. 480. Questo è il principio delle *macchine dinamo elettriche* a corrente continua, nelle quali innanzi tutto, per un risultato di qualche efficacia pratica in ordine all'intensità della corrente ed alla costanza di tale intensità, si avrà invece di un semplice rettangolo girante un avvolgimento a più spire.

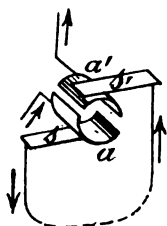
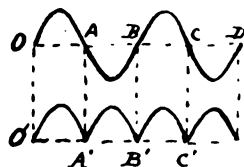



Fig. 479.

Fig. 480.

È chiaro che anche in queste macchine si deve considerare:

1. Un sistema capace di fornire un campo magnetico fisso e costante. Lo si chiamerà *induttore*.

2. Un circuito che può muoversi relativamente al campo magnetico e che diventa sede di correnti indotte da raccogliere. Lo si chiamerà *indotto*.

3. Un sistema al quale fanno capo le regioni estreme dell'avvolgimento indotto. Lo si chiama *collettore* e non è altro che il commutatore.

4. *Spazzole* o molle fisse striscianti sul collettore, che servono a raccogliere la corrente.

§ 364. **Indotto del Pacinotti ed indotto a tamburo.** — L'indotto od *armatura* delle dinamo può avere forma varia. La forma classica e largamente diffusa che segnò un altissimo progresso nella costruzione delle dinamo, è quella ad anello, così detta perchè il filo indotto è avvolto a spire ed in circuito chiuso su di un anello di ferro dolce. Ad intervalli il filo avvolto sull'anello comunica con strisce metalliche fra loro isolate ed innestate lungo generatrici del cilindro costituente l'asse di rotazione. La parte di asse munita di tali strisce costi-

La dinamo ad anelio del Pacinotti.

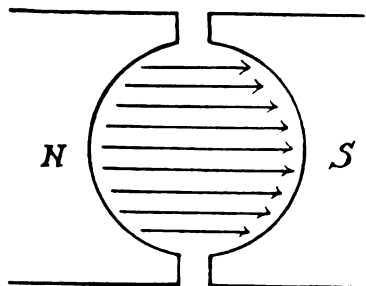



Fig. 481.

Il campo magnetico che fra i poli dell'induttore avrebbe per le proprie linee di forza la disposizione qui indicata;

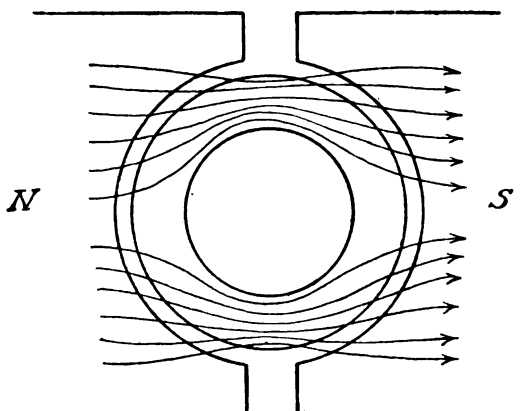



Fig. 482.

coll'anello di ferro dolce sopportante l'avvolgimento indotto assunse questa disposizione.

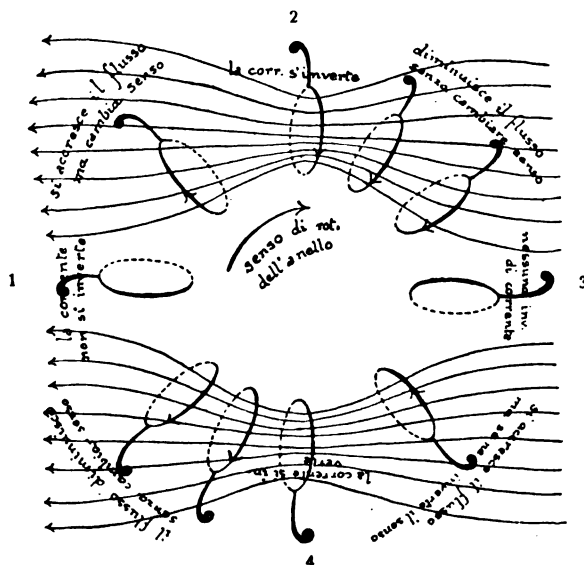
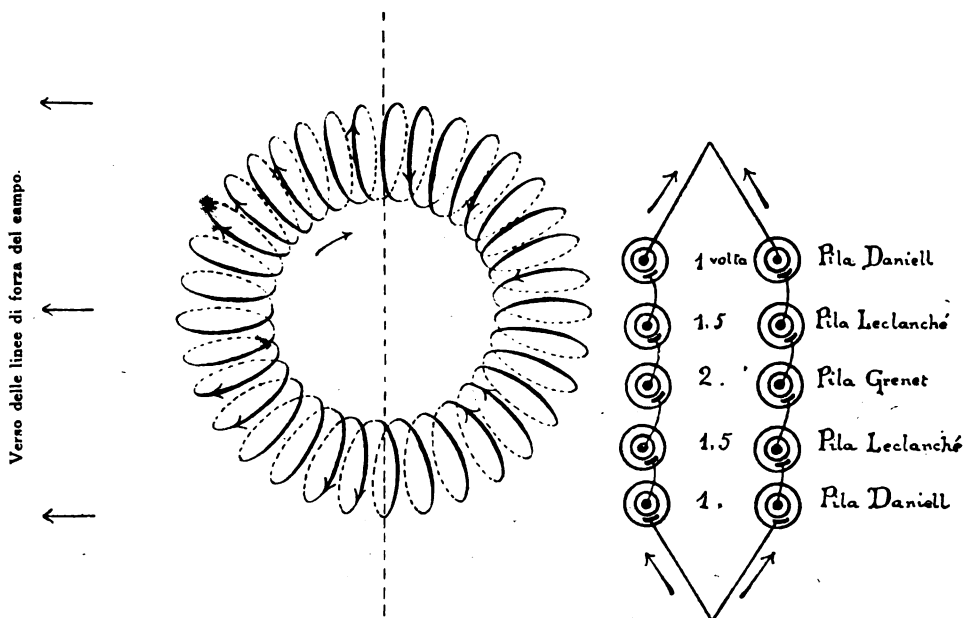
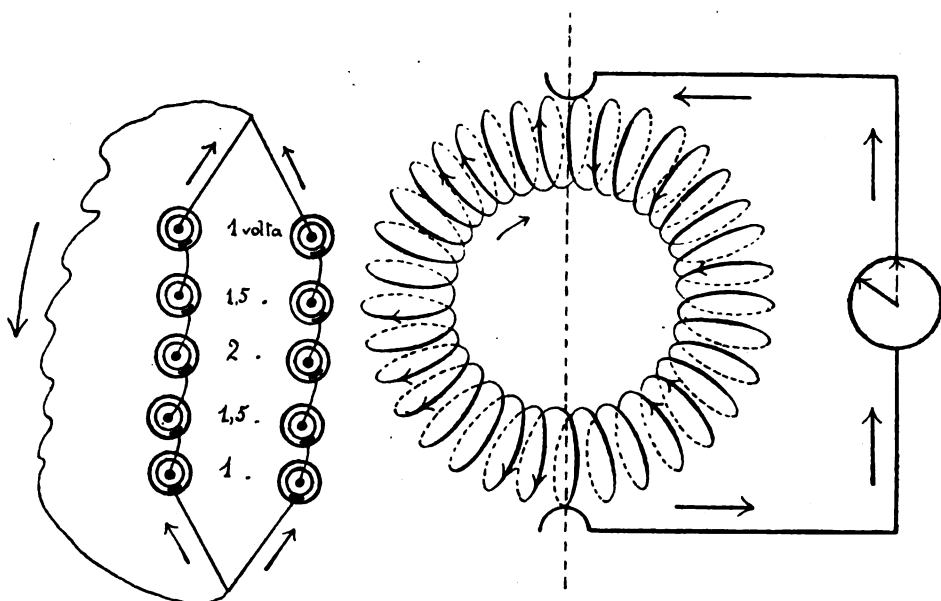



Fig. 483. **- Per intendere come funzioni la dinamo ad anello, supponiamo, secondo indica questa figura, che si tratti del movimento, da sinistra a destra, coll'anello (qui non rappresentato per semplicità, sebbene sia rappresentato il campo magnetico) di una sola spira dell'avvolgimento chiusa in sè stessa. Ad individuare le due facce della spira è stato posto superiormente ad essa nelle varie sue posizioni una linea incurvata. La leggenda posta sulla figura, in base alle nozioni fondamentali sulle correnti indotte dice eloquentemente come vanno le cose, e vale per qualunque posizione di inizio della corrente indotta. Se si suppone che le cose si iniziano dalla posizione 1, nell'andare da 1 a 2 si avrà una certa corrente, che si invertirà quando la spira passerà per 2, e nella nuova direzione si manterrà attraverso a 3 sino alla posizione 4. Qui si invertirà e manterrà la nuova direzione da 4 a 2 attraverso ad 1 per assumerne una opposta nel moto da 1 a 3 attraverso a 2. Così indefinitamente, per ogni giro della spira, questa verrà attraversata durante un mezzo giro della corrente in un senso e durante l'altro mezzo giro della corrente in senso opposto.**

Passando dal caso di una sola spira al caso dell'avvolgimento intero, è facile vedere che il movimento (nel senso della freccia centrale) dell'anello su cui sta l'avvolgimento qui rappresentato, fa nascere in questo le correnti opposte, che indicano le frecce. Siamo in un caso analogo a quello rappresentato dalla figura a destra: le due correnti opposte ed uguali fornite dalle pile si distruggono vicendevolmente.

Ma come nel caso delle pile, la semplice aggiunta di un filo conduttore, quale è rappresentato dalla figura, fa sommare in esso le due correnti che prima si distruggevano;

così nel caso delle correnti dell'avvolgimento, si può, con molle che tocchino successivamente i punti estremi coperti delle varie spire, e che siano collegate mediante un filo conduttore, raccogliere in questo le due correnti.

Fig. 484.

Fig. 485. - Disposizione pratica dell'anello di Pacinotti. L'avvolgimento dell'anello è costituito da tante parti che dalla regione intermedia di due di esse vanno a comunicare metallicamente con pezzi metallici fra loro isolati e disposti longitudinalmente in una regione dell'albero detta *collettore*. È sulla periferia del collettore che sfiorano le spazzole raccoglitrici.

Fig. 486. - La macchina di Pacinotti che funziona da motore perchè nell'indotto si lancia la corrente della pila *P*, e l'anello conseguentemente assume una polarità magnetica fissa nello spazio in *n* ed *s*, luogo d'appoggio delle spazzole. L'anello coll'albero rispettivo si muove nel senso rappresentato dalla freccia.

tuisce il collettore e su di essa si appoggiano le spazzole. Di essa armatura si parla a lungo nella leggenda della Fig. 483. È dovuta ad Antonio Pacinotti (1860). Il Gramme ne fu a lungo ed a torto considerato l'inventore; ma al Pacinotti non mancò, sebbene in tarda ora, la rivendicazione della sua priorità. (Vedi le figure 481-487).

Altra forma di indotto è quella a *tamburo* o *cilindrica* o del *Siemens* (1874). In essa (Fig. 488) le spirali invece di essere concatenate con un

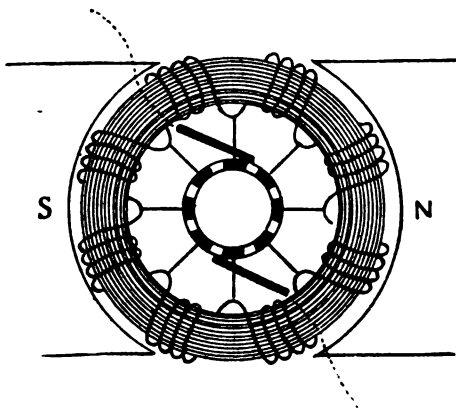
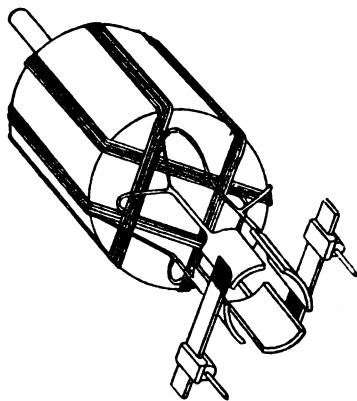



Fig. 487. *Fig. 488.*

anello sono avvolte longitudinalmente su di un nucleo cilindrico, pure in ferro. Il collettore è anche qui formato da tanti segmenti quante sono le spirali. Le funzioni di questo indotto sono le stesse di quelle dell'armatura ad anello. Ad evitare le correnti di Foucault, le quali determinano una dissipazione di energia, i nuclei si formano con fasci di fili di ferro o con lamine di ferro di forma conveniente sovrapposte ed isolate fra loro dall'ossido che si forma alla loro superficie.

§ 365. **Induttore - Eccitazione delle dinamo.** — Le dinamo industriali hanno come induttore una calamita con debole magnetizzazione dovuta al magnetismo residuo del ferro dolce che la costituisce

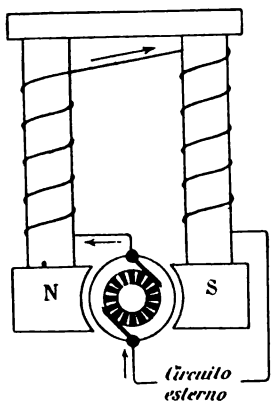
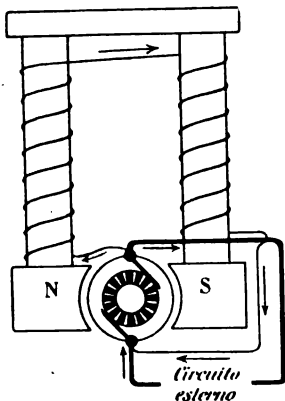
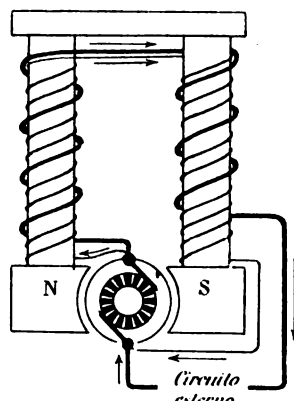
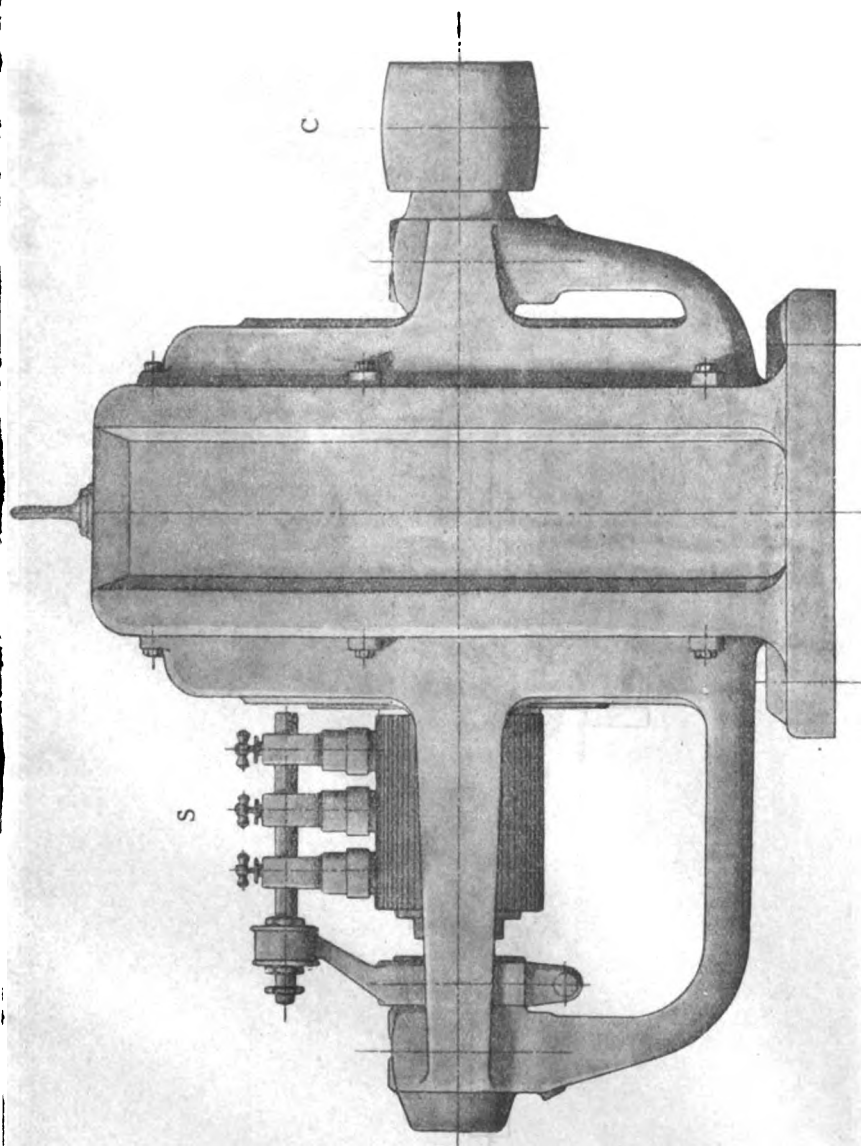
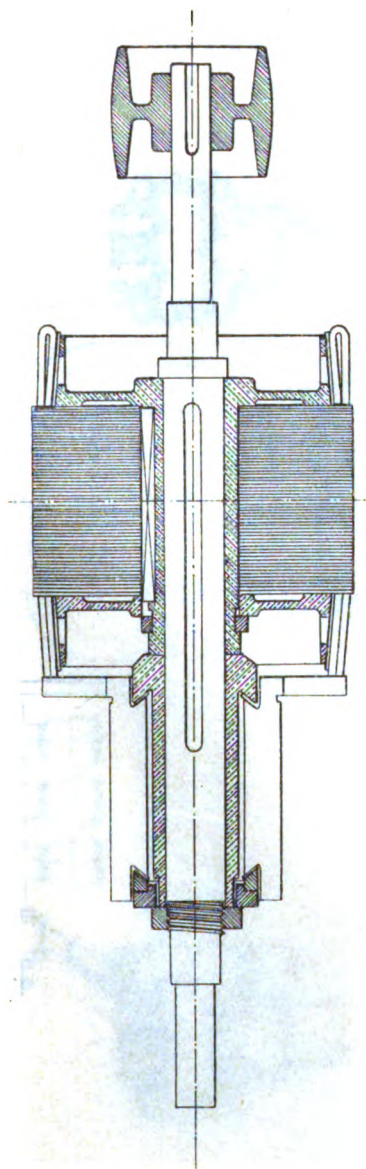
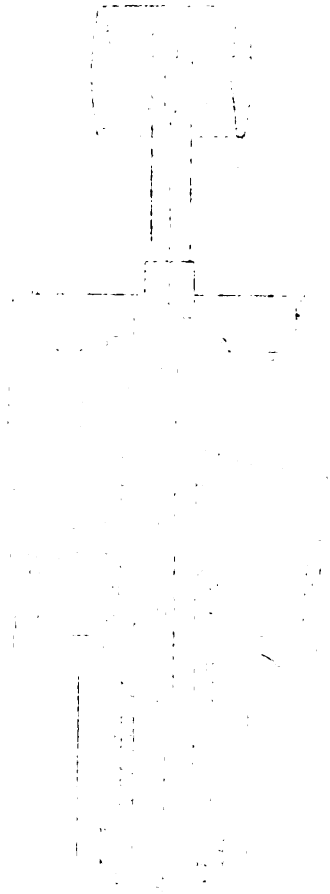
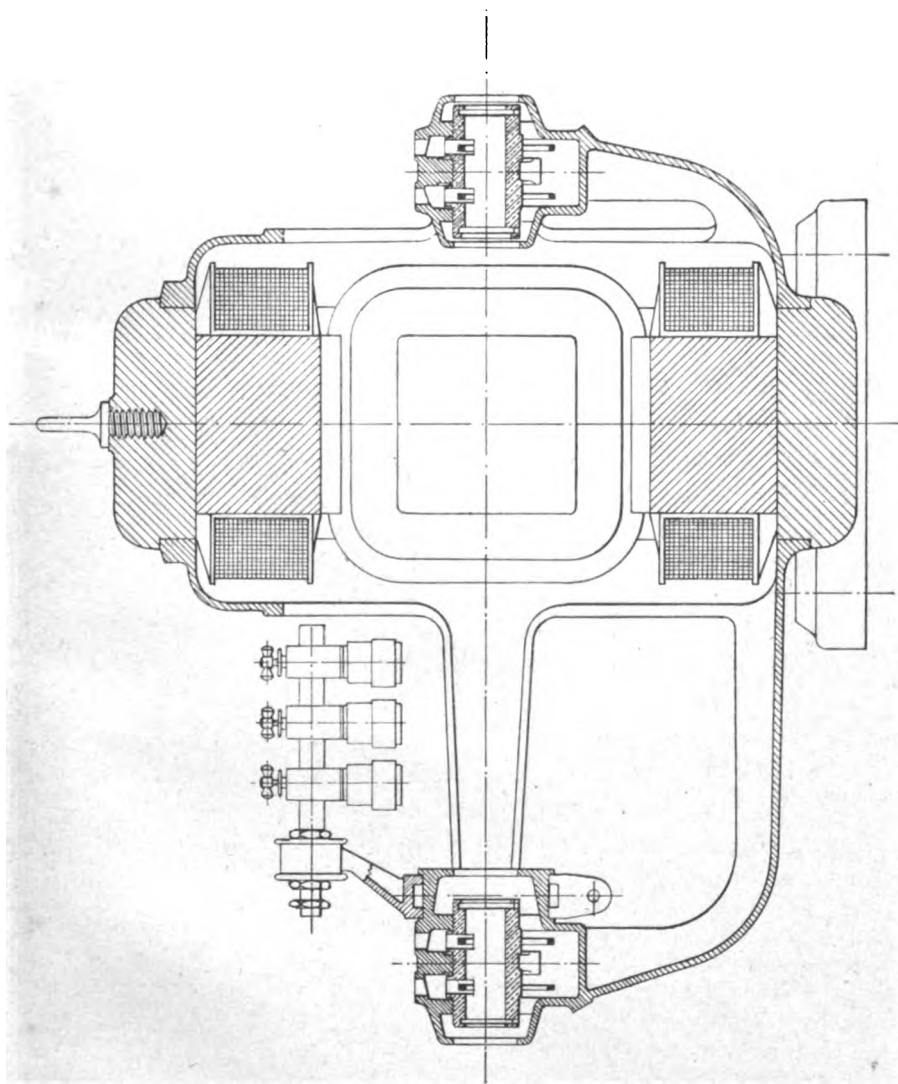



Fig. 489. - Eccitazione *serie*. *Fig. 490.* - Eccitazione *derivazione*. *Fig. 491.* - Eccitazione *composta*.

TAV. IV.

TAV. V.

TAV. IV. - *Veduta esterna di una dinamo.* In S è rappresentato uno dei due sistemi di spazzole destinate a raccogliere la corrente. In C si adatta la cinghia per trasmettere il moto rotatorio all'indotto. — TAV. V. - *Sezione dell'indotto.* — TAV. VI. - *Sezione dell'induttore e dei supporti dell'indotto.*

assoggettato una volta a calamitazione. Essa calamita ha però un avvolgimento che la fa funzionare da elettrocalamita.

L'elettrocalamita inducente ha l'avvolgimento percorso o da una corrente fornita comecchessia dall'esterno (eccitazione *indipendente*), o da una corrente presa dall'indotto della dinamo stessa, la quale in tal caso chiamasi *autoeccitatrice.* Questa corrente può essere costituita o dalla stessa corrente fornita dalla macchina (eccitazione *serie* - Fig. 489), o da una porzione di questa stessa corrente, l'altra parte andando nel conduttore esterno o di utilizzazione (eccitazione *derivazione* - Fig. 490), o dalla corrente che circola nel conduttore esterno e insieme da una corrente derivata (eccitazione *composta* - Fig. 491) perchè risultante dalla combinazione dei due ultimi modi indicati, in serie cioè ed in derivazione).

Nelle considerazioni elementari sin qui fatte abbiamo ammesso che l'induttore delle dinamo abbia due soli poli. Frequentemente difatti le dinamo sono *bipolari*; ma si hanno anche dinamo a 4, a 6, a più poli; *multipolari* cioè. Per intenderne il funzionamento basta scinderle in elementi ognuno dei quali sia costituito da due poli uno *N* e l'altro *S*.

§ 366. **Motori elettrici a corrente continua.** — È facile vedere che applicando una forza elettromotrice costante alle spazzole di una dinamo quale è ad esempio quella considerata dalla Fig. 487, l'indotto deve assumere un moto di rotazione, giacchè la corrente inviata si biforca nell'indotto a magnetizzare l'anello di ferro con polarità opposte in due regioni corrispondenti alle sezioni di esso con un piano sensibilmente normale alla linea dei poli dell'induttore e passante per l'asse dell'albero di rotazione.

La dinamo è quindi una macchina *reversibile,* in quanto, come può fornire energia elettrica comunicando ad una sua parte della energia meccanica, può fornire energia meccanica consumando in essa della energia elettrica.

Una macchina dinamo elettrica usata opportunamente diventa dunque un motore elettrico. In generale (in qualche disposizione speciale data alla dinamo la cosa non è vera), si può dire che per le macchine a corrente continua il senso di rotazione di una dinamo adoperata come motore è contrario a quello che essa avrebbe funzionando come generatrice, sempre che il senso della corrente rimanga lo stesso oppure sia invertito tanto nell'indotto quanto nell'induttore.

Riassumendo diremo che:

Un motore elettrico è una macchina che ricevendo in una sua parte mobile, detta indotto, *una corrente elettrica, converte l'energia di questa in energia meccanica, cioè di moto. Una dinamo dà invece una corrente quando una disponibile energia meccanica metta in moto il suo indotto. Motore e dinamo a corrente continua hanno la stessa costituzione: sono la stessa macchina che può funzionare in due modi opposti.*

§ 367. **Applicazioni dei motori elettrici - Treni e tram elettrici.** — L'applicazione dei motori elettrici è ormai larghissima. I treni, le tramvie, le automobili elettriche altro non sono che sistemi capaci di spostarsi mediante ruote, e nei quali una corrente elettrica opportuna determina un moto rotatorio che si trasmette convenientemente alle ruote stesse, e produce per tal modo lo spostamento che si desidera.

Nelle automobili la corrente è fornita da accumulatori su di esse collocati. Alcuni tipi di tramvie e di treni utilizzano essi pure accumulatori, ma alla maggior parte dei casi interviene una maniera diversa di raccolta della corrente che deve porre in movimento i motori.

Per intenderci, vogliamo riferirci al caso semplice di una tramvia.

L'officina generatrice della corrente lancia questa in un filo teso lungo la linea tramviaria parallelamente alle rotaie e contro il quale può scorrere una rotellina o un arco metallico (*trolley*) collegato (mediante un conduttore situato entro un'asta attaccata al cielo della carrozza) con un estremo del filo di un motore sottostante alla carrozza stessa, fisso a questa e disposto in modo da porre in movimento col suo moto le ruote. L'altro estremo del filo del motore, attraverso le ruote, comunica colle rotaie, ragione per cui la corrente lanciata lungo il filo di linea, raggiunta che abbia attraverso all'asta del *trolley* e al motore le rotaie, può lungo queste ritornare alla dinamo generatrice.

Similmente dicasi per le locomotive dei *treni elettrici.*

§ 368. **Motori a corrente alternata.** — Quella invertibilità delle funzioni che si riscontra completamente soddisfacente in una macchina dinamo-elettrica a corrente continua, trova nella pratica qualche difficoltà, salvo in alcune condizioni, per le dinamo a corrente alternata. Così tale invertibilità richiede che l'alternatore giri alla velocità sua normale (detta di sincronismo) e che gli si comunichi dall'esterno una corrente la quale abbia la stessa frequenza, ma i cui valori istantanei sieno opposti a quelli della corrente generata dall'alternatore funzionante da generatrice. In queste condizioni un alternatore funziona da motore a corrente alternata, è, come si dice, un *motore sincrono. sincrono* perchè può ruotare solamente con una velocità determinata dal numero dei poli e dalla frequenza della corrente alternata. Un siffatto motore è però poco adoperato, principalmente per la difficoltà che esso presenta per la messa in moto.

Va notato che, sebbene in pratica l'uso loro non sia conveniente a meno di adattamenti speciali e per certi casi, possono funzionare da motori anche con corrente alternata, i motori a corrente continua. Sono motori così detti a *corrente alternata semplice.* (Vedi anche il § 371).

Giovano largamente come motori a corrente alternata e hanno reso possibile le più estese e forti applicazioni dell'elettricità all'industria, talune macchine, sul conto delle quali accenneremo più avanti (§ 370) al principio fondamentale, e che ricevono il nome di *motori a campo rotante.* Si chiamano anche motori *asincroni polifasi. Asincroni* perchè (entro certi limiti) possono ruotare con qualsiasi velocità, inferiore a quella del campo.

CAPITOLO XXXVIII.

CORRENTI BIFASI E TRIFASI - MOTORI A CAMPO ROTANTE.

§ 369. **Sistema bifase e trifase.** — Un sistema di due correnti alternative spostate di un quarto di periodo l'una rispetto all'altra dicesi *sistema bifase*; ed il sistema di tre correnti alternative spostate fra loro di $^1/_3$ di periodo dicesi *sistema trifase.*

Si realizza il primo sistema facendo ruotare insieme in un campo magnetico uniforme due telai formanti un angolo di 90° fra di loro invece del solo considerato nella Fig. 473. Si capisce che le vicende della corrente che si genera in uno dei circuiti non coincidono con quelle della corrente che si genera nell'altro, ma differiscono nel tempo, di $^1/_4$ della durata di rotazione ossia di $^1/_4$ di periodo.

Si realizza il sistema trifase le cui tre correnti si troveranno fra loro come le I, II e III della Fig. 492 con tre telai fra loro distinti angolarmente di 120° due a due, e ruotanti assieme nel campo uniforme.

Questo sistema è largamente diffuso là dove si utilizzano le correnti alternate e per esso si dimostra la proprietà seguente che risulta chiarita dall'esame della Fig. 492: *Una qualsiasi delle tre correnti del sistema in un determinato istante ha intensità uguale alla somma algebrica delle intensità delle due altre nel medesimo istante, ma ha segno contrario a quello di questa somma* ($P_1M + P_3M = -P_2M$). *La corrente che circola in un filo qualunque può dunque considerarsi come la corrente di ritorno delle due altre.*

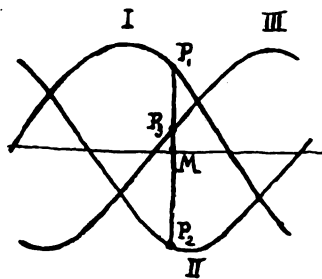



Fig. 492.

Invece di usare tre circuiti indipendenti per le tre correnti spostate di fase di $^1/_3$ di periodo, per la proprietà suindicata si può operare più semplicemente. Invece di far uso di sei conduttori da attaccare due a due ai tre telai per raccogliere le tre correnti, si può far uso di soli tre conduttori e questo in due modi differenti, sia collegando (a stella) fra loro tre estremi dei tre telai e facendo partire tre fili di conduzione dagli altri tre estremi, sia collegando in circuito (a triangolo) i tre telai e facendo partire dai punti di congiunzione due a due, tre fili di conduzione. Vedasi per maggiore chiarimento la tavola.

Nell'un caso e nell'altro, ognuna delle tre coppie possibili per il raggruppamento dei tre fili due a due viene a costituire una presa di corrente.

Dopo questo che si è detto, risulta chiarita la distribuzione abbastanza diffusa dell'energia elettrica con sistemi di tre fili invece che di due.

È facile intendere come si possano anche realizzare sistemi di più di tre correnti; di *n* correnti, che si diranno *polifasi*.

§ 370. **Motori Ferraris o a campo rotante.** — È facile dimostrare che due moti oscillatori dello stesso periodo aventi direzioni fra loro perpendicolari ed una differenza di fase di un quarto di periodo si compongono in un moto circolare uniforme (§ 314).

Ebbene, due campi magnetici oscillatori dello stesso periodo e con differenza di fase di un quarto di periodo si compongono pure in un campo magnetico rotante.

Si dimostra facilmente che due rocchetti disposti coi piani perpendicolarmente l'uno all'altro qualora si facciano percorrere da correnti alternate di ugual periodo ma spostate di fase di $^1/_4$ di periodo, in quanto generano due campi fra loro perpendicolari nelle condizioni più sopra indicate, danno origine ad un campo rotante. (I due circuiti *a* e *b* della Fig. 493).

Del pari si genera un campo rotante con tre rocchetti formanti

due a due un angolo di 120° e percorsi da correnti alternative spostate fra di loro di $^1/_3$ di periodo.

La proprietà nota (§ 314) dei campi rotanti, dovuta alle correnti di Foucault (§ 352), è di grande interesse perchè consente la costruzione di motori per corrente alternata di pregi incomparabili. Se sopra un asse si dispone una massa metallica e nello spazio circostante per mezzo di rocchetti percorsi da correnti alternative bifasi (Fig. 493) o trifasi si genera un campo magnetico rotante, detta massa metallica si metterà in rotazione. Si realizzerà così un motore senza collettore e senza spazzole.

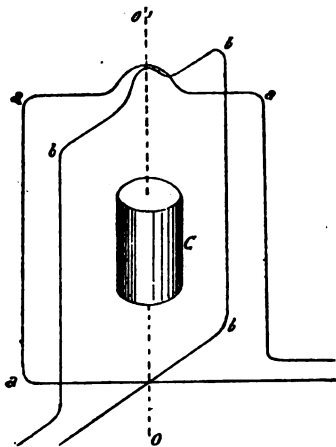



Fig. 493.

L'*induttore* (o *statore*) che genera il campo magnetico rotante è costituito da un cilindro cavo in ferro laminato, costituito cioè da lamiere sovrapposte.

Nella parte interna del cilindro cavo costituente l'induttore si praticano delle scanalature disposte secondo le generatrici del cilindro. In dette scanalature sono posti gli avvolgimenti di filo di rame formanti i rocchetti percorsi dalle correnti bifasi o trifasi (quasi sempre trifasi). La massa rotante (*indotto* o *rotore*) è formata da un cilindro in ferro laminato di diametro alquanto inferiore a quello della cavità dell'induttore ed è posta dentro questa.

L'asse di rotazione del rotore coincide con quello dello statore ed in esso sono praticate delle scanalature secondo le generatrici del cilindro che lo costituisce.

Entro le scanalature del cilindro si trovano delle sbarre di rame (Fig. 494) che alle due estremità sono collegate fra di loro da due grossi cerchi pure di rame (*avvolgimento* a *gabbia di scoiattolo*). Per effetto del campo rotante generato dai diversi rocchetti dell'induttore nei circuiti elettrici formati dalle sbarre e dai cerchi di rame, si generano delle correnti indotte che fanno ruotare tutta la massa montata sull'asse.

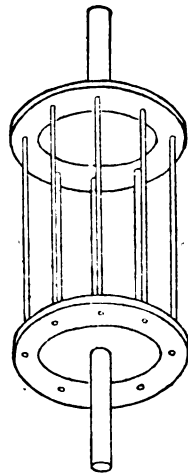



Fig. 494.

§ 371. **Motori asincroni monofasi.** — Dicemmo già che i motori a campo rotante ricevono anche il nome di motori asincroni polifasi. Oltre a questi si hanno dei *motori asincroni monofasi* in cui un rotore dello stesso tipo si muove in presenza di induttori attivati da una semplice corrente alternata. È chiaro che mentre il rotore è in riposo non può aversi in tal modo alcuna coppia motrice perchè la parte mobile, sede di correnti indotte, viene in virtù di queste a sentire azioni uguali e contrarie che si annullano.

Però se al rotore viene impressa (*avviamento*) una rotazione conveniente si avrà una dissimetria con produzione di una coppia che mantenga tale moto.

§ 372. **Gruppi convertitori.** — Un sistema formato (Fig. 495) da un motore *M* a campo rotante e da una dinamo *Dg* a corrente continua il cui asse sia collegato all'asse di quello, si chiama gruppo convertitore perchè serve a trasformare una corrente alternata in corrente continua. Nella figura, *C* rappresenta il circuito di utilizzazione di questa corrente.

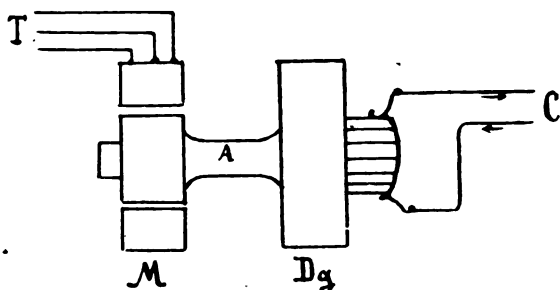



Fig. 495.

CAPITOLO XXXIX.

I TRASFORMATORI ED IL ROCCHETTO DI RUHMKORFF. TRASPORTO ELETTRICO DELL'ENERGIA.

§ 373. **Trasformatori.** — Altre macchine, basate sui fenomeni di induzione, sono i trasformatori. A suo tempo notammo che due correnti dotate della stessa potenza possono avere fisionomia differente. Una di grande intensità e derivante da piccola forza elettromotrice può equivalere per quantità di energia fornita nell'unità di tempo ad un'altra di piccola intensità e derivante da grande forza elettromotrice.

Ebbene, è possibile mutare la fisionomia di una corrente senza variarne la potenza. Da una corrente di debole forza elettromotrice e di grande intensità si può passare ad una corrente di debole intensità e di grande forza elettomotrice. Questo si può fare valendosi dei trasformatori, che sono basati sui fenomeni di induzione. Si chiama trasformatore *un apparecchio che serve a trasformare una data potenza elettrica in un'altra equivalente potenza, pure elettrica, in modo che risultino variati i rispettivi valori della f. e. m. e dell'intensità di corrente.* Naturalmente il prodotto della f. e. m. primitiva E_1 per l'intensità di corrente I_1, sarà (salve le perdite inevitabili in ogni macchina, ma piccola nei trasformatori) all'incirca uguale al prodotto della nuova f. e. m. E_2 per la nuova intensità di corrente I_2. Per le correnti alternate i trasformatori sono costituiti (Fig. 496) da due avvolgimenti distinti *A* ed *A'* di filo conduttore intorno ad un nucleo di ferro costituente un circuito chiuso per le linee di forza magnetica. Una corrente alternata che si lanci in uno degli avvolgimenti, determina per induzione una corrente alternata nell'altro avvolgimento.

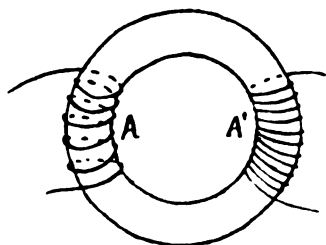



Fig. 496.

Le forze elettromotrici delle due correnti stanno in proporzione diretta col numero delle spire degli avvolgimenti rispettivi; ragione per cui le intensità stanno in ragione inversa.

Il rapporto del numero delle spire dei due avvolgimenti, che appunto per la trasformazione si fanno differenti, varierà al variare dell'effetto desiderato di trasformazione.

Di tutto ciò possiamo renderci alla meglio conto col ragionamento seguente. Trascurando la perdita di energia in calore, supponiamo di alimentare uno degli avvolgimenti con una corrente alternativa. Siccome ciascuna spira dei due circuiti elettrici costituenti gli avvolgimenti abbraccia lo stesso flusso magnetico alternativo del nucleo di ferro, la variazione alternativa del flusso abbracciato sarà uguale per ciascuna spira; e quindi in ognuna di esse si avrà la stessa f. e. m. indotta. Perciò se n_1 è il numero dei giri delle spire del primo avvolgimento, n_2 il numero dei giri delle spire del secondo avvolgimento ed e la f. e. m. generata dalla variazione del flusso in ciascuna spira, ai capi del primo avvolgimento si avrà una f. e. m. $E_1 = n_1 e$ ed ai capi del 2° avvolgimento una f. e. m. $E_2 = n_2 e$.

Siccome la potenza elettrica è la stessa nei due casi,

$$E_1 I_1 = E_2 I_2,$$

si avrà:

$$n_1 e I_1 = n_2 e I_2$$

ossia:

$$n_1 I_1 = n_2 I_2. \qquad (112)$$

La quale relazione dice che se uno degli avvolgimenti che chiameremo *primario* ha un grande numero di giri e l'altro, che chiameremo *secondario*, è invece costituito da un piccolo numero di giri; l'intensità della corrente subisce un aumento nel rapporto del numero dei giri. Si avrà allora, in virtù della prima delle ultime tre relazioni scritte, che la tensione applicata al primario verrà ridotta ed utilizzata nel secondario nel rapporto inverso del numero dei giri.

Al rapporto $E_1 : E_2$ si dà il nome di *coefficiente di trasformazione.*

§ 374. **Rocchetto di Ruhmkorff.** — Una specie di trasformatore, di grande interesse per le esperienze di fisica, è il così detto *Rocchetto di Ruhmkorff.* In uno degli avvolgimenti che lo costituiscono si lancia di solito una corrente continua rapidamente interrotta; ma si può anche usare in circostanze speciali una corrente alternata. Noi, in quel che diremo, supporremo che si usi corrente continua periodicamente interrotta da un dispositivo inserito nello stesso rocchetto.

Il rocchetto di Ruhmkorff è sostanzialmente costituito (la Fig. 497 lo rappresenta schematicamente e la 498 veduto nel complesso) da due rocchetti, uno (primario) dentro l'altro (secondario). Il primario è costituito da poche spire di filo grosso; il secondario da numerosi strati di filo sottile. Questo è aperto, e gli estremi C e B che si possono collegare (Fig. 498) con aste H e I cui si collegano conduttori più o meno avvicinabili si dicono i *poli* del rocchetto o gli *estremi del secondario.* Dentro al primario si pone un nucleo di fili di ferro. Al primario è annesso un *interruttore* che può essere, o (*interruttore a martello*) un qualche cosa (L, G, H, E) di simile a ciò che è un campanello elettrico, nel quale come si sa la corrente che vi si lancia viene automaticamente interrotta, o (*interruttore elettrolitico*) un semplice recipiente contenente una soluzione opportuna entro cui pescano un conduttore che lascia scoperta una piccola punta di platino ed una lastra di piombo (Fig. 499). Questo recipiente si inserisce nel circuito primario del rocchetto per modo che la punta di platino comu-

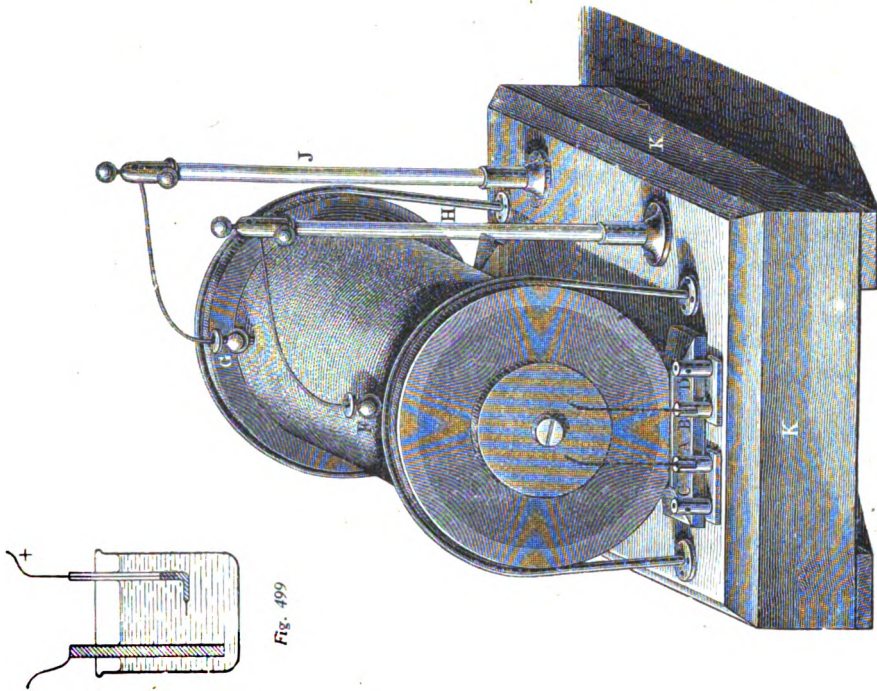



Fig. 497.

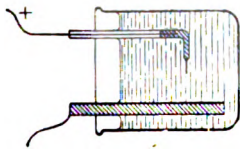
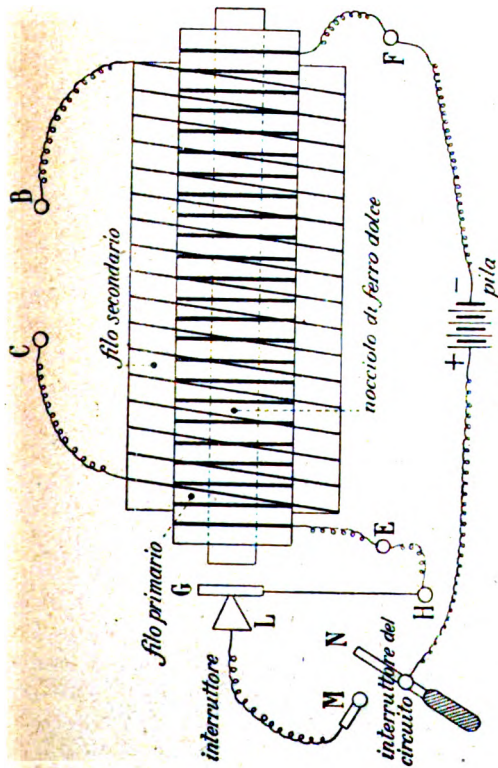



Fig. 499

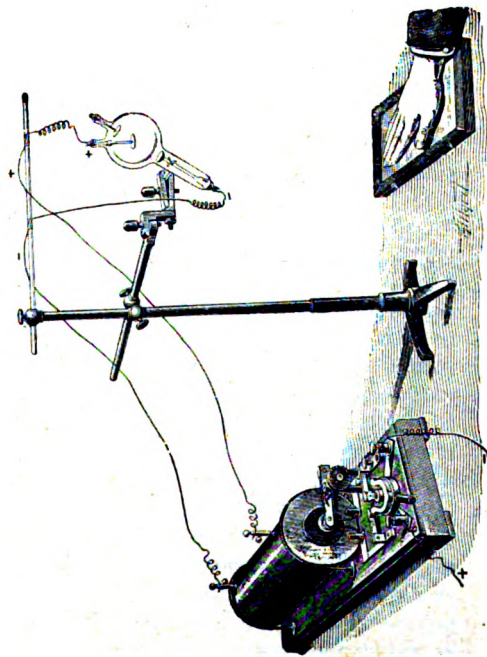



Fig. 500. - **Come si collegano gli estremi del secondario di un rocchetto con un tubo di Röntgen per ottenere una radiografia.**

Fig. 498.

nichi col polo positivo della pila che dà la corrente alimentatrice. Siffatto sistema, se la corrente che si usa ha una sufficiente forza elettromotrice (una trentina di *volta* almeno) non si comporta come un semplice voltametro ma diventa sede di un fenomeno nuovo per cui la corrente viene periodicamente e rapidamente interrotta.

Mentre questa corrente passa nel primario, gli estremi del secondario diventano sede di f. e. m. indotte alternative elevate, che determinano la produzione di scariche alternate se tali estremi sono sufficientemente avvicinati o di scariche in un determinato senso (in virtù di che può parlarsi di polarità per gli estremi del secondario) se sono sufficientemente lontani perchè non possa determinare la scarica la f. e. m. indotta (più debole) dovuta alla chiusura del circuito primario. Quando si usi l'interruttore a martello per ottenere più marcata la indicata differenza fra l'effetto di induzione dovuto alla apertura del circuito rispetto a quello dovuto alla chiusura, si riduce la scintilla di apertura producentesi fra L e G (Fig. 497) collegando L ed H alle armature di un condensatore.

Il rocchetto di Ruhmkorff, si usa spesso per produrre scariche in tubi a gas rarefatto (Fig. 500).

§ 375. **Trasporto a distanza dell'energia.** — La riversibilità di una dinamo a corrente continua suggerisce la maniera di trasportare a distanza nel luogo di utilizzazione, energia meccanica o energia trasformabile in energia meccanica, che si trovi in luogo ove non occorra o non convenga utilizzarla. Si tratti ad esempio della energia di caduta di una massa d'acqua. Quest'acqua si impiegherà a muovere (Fig. 501) una turbina T la quale metterà in azione una *dinamo generatrice* Dg. La corrente da questa si manderà per mezzo di fili conduttori L nel luogo di utilizzazione ove metterà in azione un motore M a corrente continua il quale darà la energia meccanica che interessi avere.

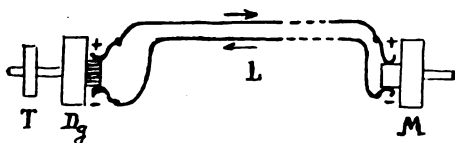



Fig. 501.

Ma la trasmissione con corrente continua dà luogo a perdite enormi, soprattutto per il riscaldamento dei fili di trasmissione, e non può quindi servire che per brevi distanze.

Si riducono tali perdite facendo uso nel modo seguente di correnti alternate. L'acqua mette in moto (Fig. 502) una turbina T la quale muove un alternatore A che dà una corrente alternata la quale si immette nel trasformatore T_e per ottenerne l'elevamento di forza elettromotrice. La corrente ad alto potenziale di intensità piccola rispetto a quella che fu immessa nel trasformatore e quindi tale da dissipare poca della sua energia in calore (il calore *joule* è proporzionale al quadrato della intensità della corrente) va nella linea L; raggiunge

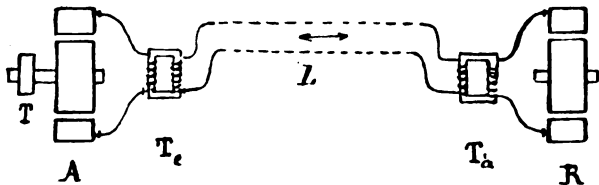
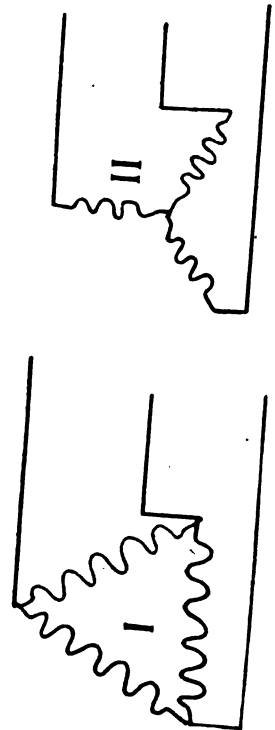
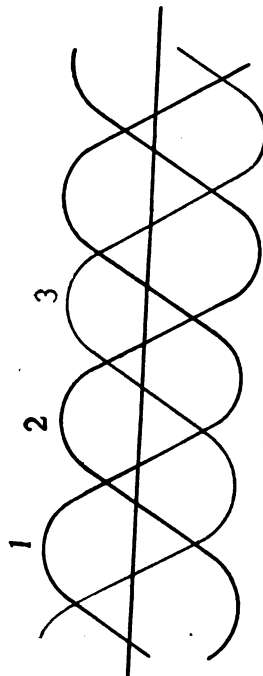
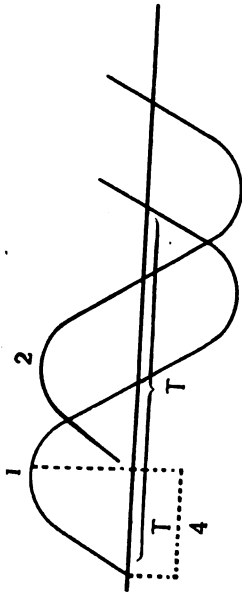
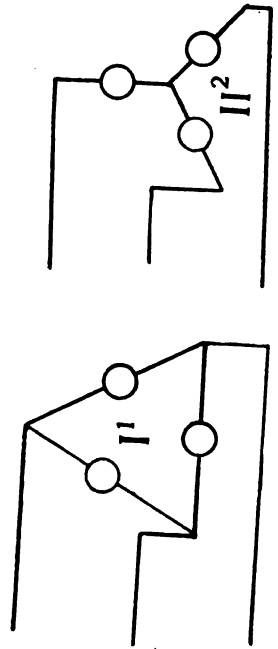
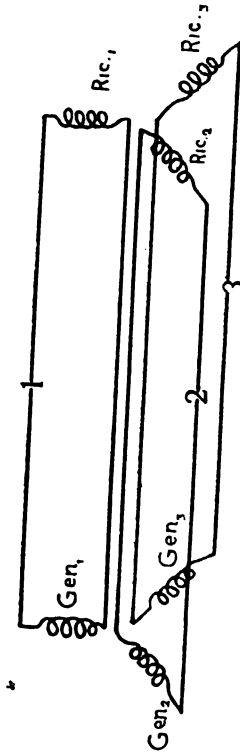
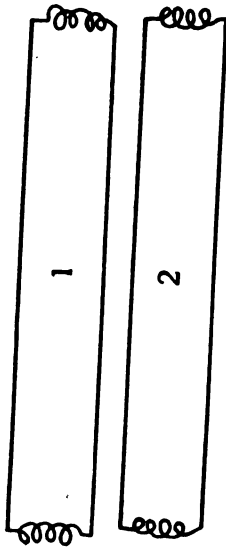



Fig. 502.

1
2
T
T
4
1
2
1
2
3
1
Gen₁
Ric.₁
Gen₂
Gen₃
2
Ric.₂
Ric.₃
3
I
II
I¹
II²

TAV. VII.

Nella prima linea di questa Tavola sono rappresentate sul diagramma a sinistra due correnti (1 e 2) aventi una differenza di fase di un quarto di periodo. Si possono ottenere facendo ruotare in un campo magnetico uniforme due avvolgimenti formanti fra loro un angolo di 90°. Le due correnti ottenute possono utilizzarsi separatamente in due circuiti come quelli rappresentati a destra sulla medesima prima linea rispettivamente in 1 e 2. Si suole talvolta fare uso di un tale sistema di due correnti spostate di fase di un quarto di periodo e costituenti un cosidetto sistema bifase.

Nella seconda linea è rappresentato un sistema di tre correnti spostate di fase di un terzo di periodo l'una l'altra. Costituiscono un sistema trifase. Tali correnti possono prodursi mediante la rotazione in un campo magnetico uniforme di tre avvolgimenti spostati angolarmente l'uno rispetto all'altro di 120°. Ciascun avvolgimento potrebbe chiudersi in sè stesso per modo da lanciare la propria corrente in un ricevitore opportuno. Si avrebbero così tre circuiti come sono quelli schematicamente rappresentati a destra nella stessa seconda linea della Tavola. Ma per la proprietà di un sistema trifase, indicata nel testo, si possono riunire insieme i tre primi capi degli avvolgimenti come indica la Fig. II, e lanciare le tre correnti su tre fili di linea a raggiungere i tre ricevitori, fra loro collegati come indica la Fig. II^2.

Il raggruppamento degli avvolgimenti generatori e dei ricevitori rappresentati rispettivamente dalle Fig. II e II^2 si dice raggruppamento a *stella*.

Si può usare per gli avvolgimenti generatori come per quelli ricevitori anche il raggruppamento detto a *triangolo*. Pei generatori è rappresentato dalla Fig. I, e per i ricevitori viene rappresentato dalla Fig. I^1.

IMP. LIT. A. CACCIARI - BOLOGNA

presso il luogo di utilizzazione un trasformatore T_a che ne abbassa la forza elettromotrice (altrimenti pericolosa e inadatta per gli apparecchi nei quali deve entrare) e così entra in un motore R per corrente alternata dando all'albero di questo la energia meccanica che si vuole utilizzare.

CAPITOLO XL.

LE ONDE ELETTRICHE E LE LORO APPLICAZIONI.

§ 376. **La teoria del Maxwell e la sua fecondità.** — Clerk Maxwell, un grande fisico matematico inglese, mentre andavano facendosi strada le idee del Faraday secondo le quali le azioni elettriche non potevano esercitarsi a distanza senza l'intervento di un mezzo interposto, concepì l'ardita ipotesi secondo la quale la luce avrebbe consistito nella sua intima essenza in un processo vibratorio producentesi nelle molecole dei corpi luminosi, paragonabile ad una corrente alternata di grandissima frequenza. Le perturbazioni luminose, cioè la luce, e le azioni elettriche si sarebbero trasmesse con analogo moto ondulatorio trasversale nell'etere cosmico. Dovevano esistere onde elettriche nell'etere del tutto simili alle onde luminose, differenti da queste solo per la loro lunghezza d'onda.

Con la sua concezione il Maxwell iniziò un mirabile periodo di ricerca nel quale si affinarono e si coordinarono tutti gli strumenti della più sagace indagine scientifica. I risultati dell'opera degli scienziati vennero poi con grande abilità e pertinacia portati presto nel campo delle applicazioni.

Per acquistare alle seducenti idee del Maxwell un valore solido e reale, bisognava che qualche fatto sperimentale venisse loro in appoggio. Bisognava poter produrre onde elettriche e trovar modo di segnalarle nello spazio.

Hertz ideò due apparecchi: l'eccitatore ed il risonatore, atti, l'uno a produrre, mediante scariche oscillanti, onde elettriche; l'altro a rivelarle.

Con gli apparecchi indicati, Hertz potè misurare la velocità di propagazione delle onde elettriche, e verificare che essa coincide esattamente colla velocità della luce. Potè mettere in evidenza che le onde si riflettono come la luce; potè provare che le onde elettriche si rifrangono.

Ma al fine di avvalorare meglio le concezioni del Maxwell, così da poter stabilire una intima relazione fra elettricità e luce, che, data la stretta parentela fra luce e calore, già messa in rilievo dal Melloni, avrebbe raccolte in un unico meccanismo d'origine tre energie fisiche per lungo tempo ritenute distinte; era necessario provare che colle onde elettriche si possono produrre tutti gli altri fenomeni analoghi ai numerosi dell'ottica.

Là dove Hertz non aveva potuto giungere arrivò Augusto Righi.

Cogli apparecchi da lui ideati, l'oscillatore ed il risonatore (§ 384), che gli consentirono di produrre e di rivelare onde elettriche di gran lunga più corte di quelle ottenute da Hertz, potè costruire una completa *ottica delle oscillazioni elettriche*, producendo colle onde elettriche tutti i fenomeni analoghi a quelli della luce, e realizzando così la genialissima sintesi delle energie fisiche, mercè la quale, calore e luce vanno ormai considerate come forme diverse dell'energia etettromagnetica vibratoria dell'etere. Alle sue ricerche d'indole prettamente scientifica seguirono i tentativi pratici di Guglielmo Marconi che portarono al telegrafo senza filo.

§ 377. **Scarica oscillante e non oscillante.** — Consideriamo due recipienti contenenti un liquido a livelli differenti, e riuniti mediante un tubo di gomma che si possa schiacciare più o meno mediante una pinzetta in una sua posizione mediana. Se la pinzetta lascia lievemente aperto il tubo, la resistenza opposta al passaggio del liquido dovuto alla tendenza di questo a portarsi nei due recipienti al medesimo livello, è molto grande; cosicchè le superfici libere dei liquidi raggiungeranno lo stesso piano orizzontale *senza oscillazione* della massa liquida. Se invece il tubo è largo e totalmente aperto, si raggiunge lo stesso livello per il liquido nei due recipienti, ma prima si producono *oscillazioni* la cui ampiezza diminuisce a poco a poco in causa degli attriti.

Così, nel primo caso il liquido scorre sempre nel medesimo senso mentre che nel secondo caso scorre alternativamente in un senso o nell'altro. In questo ultimo caso

NOTA — Raccoglieremo entro asterischi (**) quelle parti che si possono tralasciare in una prima lettura.

l'ampiezza delle oscillazioni diminuisce a poco a poco, di maniera che, tutto sommato alla fine una certa quantità di liquido è passata dal recipiente che lo conteneva a più alto livello all'altro recipiente, e i due livelli si sono portati nel medesimo piano orizzontale.

Le oscillazioni che per tal modo si compiono, appariscono anche ad una prima osservazione isocrone, e quindi tali che la loro durata è indipendente dall'ampiezza via via decrescente. Tale durata risulta indipendente anche dalla resistenza opposta dal tubo al passaggio del liquido, almeno se essa resistenza è piccola.

Una modificazione del periodo vibratorio si ottiene invece col riempire più o meno di liquido i due recipienti. Lo si aumenta aggiungendo del liquido perchè per una medesima differenza di livello e quindi per una medesima forza motrice, vi ha una massa più grande da muovere.

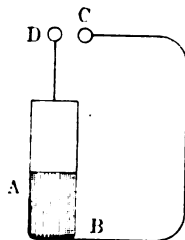



Fig. 503.

In conclusione, noi possiamo raggiungere l'equilibrio per il liquido nei due recipienti sia con una corrente liquida continua, sia con una serie di correnti dirette alternativamente in un senso e nell'altro. In questo ultimo caso le oscillazioni hanno un periodo ben determinato che dipende dalla costruzione dell'apparecchio.

Qualche cosa di analogo evidentemente potrà avvenire con una scarica che stabilisca l'equilibrio elettrico fra due conduttori carichi affacciati l'uno all'altro. Così, da un condensatore A (Fig. 503) potrà ottenersi, scaricandolo, col ravvicinare alla sfera estrema D dell'armatura interna alla sfera C comunicante in A coll'armatura esterna, o una scarica continua o una scarica oscillante. Per verificare se la scarica è continua od oscillante basterà esaminare la scintilla che si forma fra D e C allo specchio girante (§ 266, Vol. I) giacchè, come sappiamo, questo ci mostra, simultaneamente, ma posti a lato gli uni agli altri nello spazio, i fenomeni che succedendosi nel tempo apparirebbero nello stesso luogo.

Orbene, se la resistenza R del circuito collegante le due armature del condensatore (mentre il circuito è chiuso dalla scintilla, la resistenza della regione di dielettrico che viene occupata da questa può ritenersi trascurabile) è grande, la scarica è continua, l'elettricità cioè passa formando una corrente non interrotta nè invertita mai. L'immagine della scintilla a (Fig. 504) supposta orizzontale e distesa verticalmente dallo specchio girante, è una striscia luminosa non presentante discontinuità od eterogeneità in senso verticale.

Fig. 504.

Se la resistenza R invece è sufficientemente piccola, la scarica è discontinua ed alternata: le sfere D e C compiono l'una dopo l'altra alternativamente lo stesso ufficio. L'immagine della scintilla presenta non solo delle discontinuità, ma una alternanza regolare delle sue parti destra e sinistra, al che giova la circostanza dell'avere la scintilla (specialmente se prodotta fra elettrodi di zinco o di cadmio) luminosità marcatamente differenti alle due estremità.

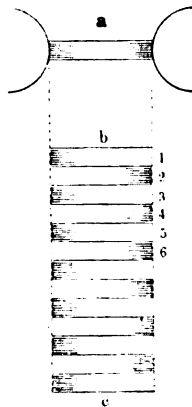
Vi è dunque una resistenza limite R_0 per la quale l'immagine passa dalla forma continua alla discontinua.

** Conoscendo la velocità colla quale ruota lo specchio, è facile determinare il periodo delle vibrazioni. Esso è generalmente brevissimo, dell'ordine del milionesimo di secondo. A parità di tutti gli altri elementi esso aumenta colla capacità del condensatore che si scarica; ed aumenta pure quando si riuniscono le armature con un filo piegato a spirale, presentante per conseguenza della autoinduzione.

Si può dimostrare col calcolo che se fra la resistenza R del circuito, l'autoinduzione L, e la capacità C esiste la relazione $R^2 > \frac{4L}{C}$, la scarica è continua, mentre che la scarica è oscillante se esiste la relazione $R^2 < \frac{4L}{C}$.

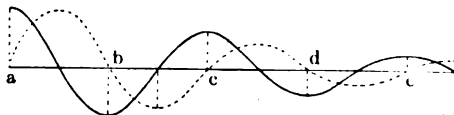
Si può di più dimostrare che il periodo delle oscillazioni in questo ultimo caso è espresso dalla uguaglianza

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \qquad (113)$$

Fissi C ed L, il minimo valore per T si avrà quando la resistenza R abbia valore trascurabile. Per $R = o$, l'ultima relazione diventa la notissima formola di Thomson

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.^{**} \qquad (114)$$

Non è male avvertire che la scarica oscillante di un condensatore, pur costituita da oscillazioni isocrone, va rapidamente decrescendo di ampiezza, è cioè, come si dice, *smorzata*. Graficamente la si può rappresentare colla curva piana della Fig. 505 nella quale lungo l'asse delle ascisse si sono rappresentati i tempi e lungo l'asse delle ordinate le differenze di potenziale fra le armature del condensatore. La curva punteggiata rappresenterà corrispondentemente la variazione col tempo della intensità di corrente, nulla quando la differenza di potenziale è massima, e viceversa.

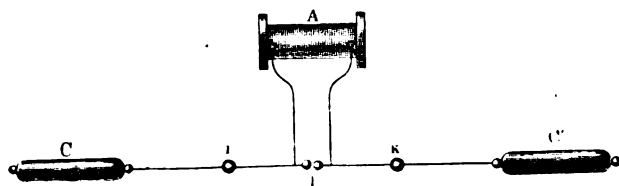
Fig. 505.

Una scarica non smorzata vien rappresentata invece da una sinussoide.

§ 378. **Eccitatore di Hertz.** — Per dare valore alla ipotesi del Maxwell, si doveva tentare di raggiungere colla esperienza condizioni il più che fosse stato possibile prossime a quelle supposte nell'interno delle particelle di un corpo luminoso. Le supposte alternazioni elettriche costituenti il fenomeno luminoso dovevano essere di una rapidità estrema. Si doveva quindi tentare la produzione di scariche oscillanti a periodo molto piccolo.

Osserviamo che i fenomeni di scarica oscillante, dei quali abbiamo più sopra detto brevemente, si producono ogni volta che due corpi portati a potenziali differenti vengono bruscamente riuniti da un conduttore. Inoltre l'ultima formola scritta dice che per ottenere oscillazioni molto rapide bisogna ridurre più che si può la capacità del sistema che si scarica ed evitare, perchè la autoinduzione di questa sia piccolissima, tutte le sinuosità nel circuito che collega i punti inizialmente portati a potenziali differenti.

Fig. 506.

Hertz realizzò tali condizioni nel modo seguente:

Gli estremi del secondario di un rocchetto di induzione A (parte superiore della Fig. 506) sono in comunicazione con due aste metalliche rettilinee terminate ad un estremo mediante due sferette B affacciate l'una all'altra ed all'altro estremo mediante due conduttori C e C'. Alla prima introduzione della corrente nel primario del rocchetto sorge in B fra le due aste metalliche una differenza di potenziale che cresce sino al momento in cui scocca la scintilla e l'intervallo B presenti una resistenza trascurabile.

Si avrà allora la sovrapposizione dei due fatti seguenti:

1. Scarica del secondario, *intermittente* ed a lungo periodo (dell'ordine del millesimo di secondo).

2. Scarica *oscillatoria* rapidamente smorzata di periodo brevissimo (dell'ordine del bilionesimo di secondo) per la equivalenza (salvo la minore capacità) del sistema CBC' al condensatore $DABC$.

Quest'ultimo fatto è il fenomeno che fornirà gli effetti che ci interessano.

Si potrà aumentare o diminuire il periodo delle oscillazioni fornite dalla descritta disposizione od apparecchio di Hertz e da questo *eccitatore* variandone la capacità col variare le dimensioni delle masse metalliche che la costituiscono.

Non è difficile passare mentalmente dal caso del circuito col condensatore della Fig. 505 al caso dell'eccitatore di Hertz rappresentato a parte dai due conduttori AB e CD della figura, se si suppone che il vetro del condensatore venga sostituito da aria avente massa di più in più grande, e le armature si allontanino e si dispongano grado grado in linea retta coi conduttori estremi fra i quali avviene la scarica.

§ 379. **Onde elettromagnetiche - Loro propagazione.** — Quando l'eccitatore funziona si ha l'indicato moto rapidamente alternato di elettricità attraverso alla regione B, lo spazio circostante diventa sede di un fenomeno che si spiega solo ammettendo che la perturbazione elettrica prodotta nell'eccitatore si propaghi in esso spazio con una velocità grandissima ma determinata e con moto ondulatorio trasversale dell'etere cosmico occupante lo spazio medesimo. Si dice che questo è percorso da *onde elettriche*.

** Per intenderci, supponiamo che in un istante determinato la corrente rapidamente alternata attraversante la regione ab (Fig. 507) dell'eccitatore $a'abb'$ abbia il senso rappresentato dalla freccia c.

Secondo le regole generali dell'elettromagnetismo dovrebbe nascere un campo magnetico M verticale diretto verso il basso in ogni punto della linea orizzontale OO' condotta normalmente all'eccitatore e passante per il suo punto medio.

Ciò appunto succederebbe se l'azione magnetica si propagasse con una velocità infinita e in questo caso i fenomeni sarebbero simultaneamente per tutti i punti della linea OO'. Ma l'azione magnetica si propaga con una velocità finita V, per cui se T è il periodo della scarica oscillante, in M', ad una distanza $L = V\frac{T}{2}$ non si sente l'effetto della corrente attuale fra a e b, ma quello della corrente che si produsse sull'eccitatore mezzo periodo avanti, vale a dire l'effetto di una corrente uguale e di segno contrario: il campo è dunque verticale, ma diretto verso l'alto. In M'', ad una distanza doppia $A = VT$, la corrente della quale si risente attualmente l'effetto si produceva nell'oscillatore un periodo intero primo: il campo sarà allora uguale ad M e diretto nello stesso senso. Come per le onde sonore, la distanza di due punti che sono nel medesimo istante nello stesso stato si chiama *lunghezza d'onda*.

In sostanza, esiste in ogni punto della linea OO' un campo magnetico verticale che è alternativo ma i campi dei diversi punti della linea non variano in modo sincrono. Due punti come P ed R distanti della quantità d, non subiranno contemporaneamente fenomeni identici. I fenomeni in R saranno identici a quelli di P, ma con un ritardo uguale a $\frac{d}{V}$: il fenomeno impiega un tempo $\frac{d}{V}$ a propagarsi da P a R.

Ciò che abbiam sinora detto riguarda una parte soltanto dei fatti che avvengono intorno all'eccitatore. Nel momento in cui la scarica comincia a prodursi nel senso della freccia c, la sfera b è caricata positivamente e la sfera a negativamente, per cui considerando una piccola carica unitaria positiva situata in un punto qualunque di OO' (ammesso che l'azione elettrica si propaghi istantaneamente) essa sarà soggetta ad una forza orizzontale diretta parallelamente all'oscillatore e nella direzione della freccia c. Essa subirà vicende in relazione al carattere oscillatorio della scarica: sarà cioè una forza oscillante.

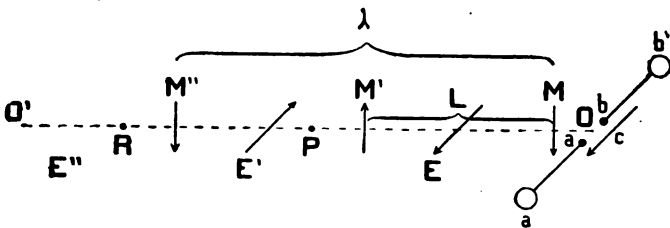



Fig. 507.

Propagandosi la forza elettrica con una velocità finita uguale a quella della forza magnetica, non avrà in un determinato momento lo stesso valore e la stessa direzione in tutti i punti della retta OO'. Avrà valori che si susseguiranno per un determinato istante in modo analogo a come si susseguono quelli della forza magnetica. Analogo, ma non identico.

Difatti, quando le cariche dei due conduttori sono massime in valore assoluto, la corrente che va dall'uno all'altro sta invertendosi e quindi passa pel valore zero. La forza magnetica è dunque nulla negli istanti in cui la forza elettrica è massima in valor assoluto. E così, quando le cariche sono nulle, la corrente ha la massima intensità, cioè quando la forza elettrica è nulla la forza magnetica ha un valore assoluto massimo.

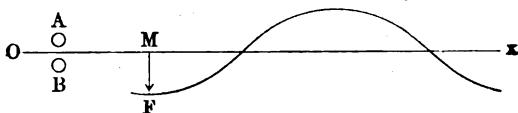
All'insieme più sopra considerato, di una forza elettrica e di una forza magnetica, entrambe alternative, normali fra di loro e propagantisi colla medesima velocità, si dà il nome di *onda elettromagnetica*.

Si può dare una rappresentazione grafica delle onde elettromagnetiche analoga a quella delle onde sonore, ciò che avviene lungo una retta Ox passante per il punto medio dell'intervallo AB e perpendicolare allo stesso segmento AB (Fig. 508).

Se ad un dato momento, mentre dura la scarica oscillante, il conduttore b è carico + e a è —, la forza elettrica in un punto M di Ox sarà diretta come MF parallela ad ab. Questo stesso valore della forza elettrica esisteva un momento prima in un punto posto fra F ed ab, ed esisterà un momento dopo per un punto alla sinistra di F. Se per tutti i punti della retta OO' si tracciano in modo simile i valori della forza elettrica ad un dato momento, le estremità delle ordinate formeranno la solita curva serpeggiante

chiamata sinusoide. Per conoscere poi come varia la forza elettrica col tempo, basterà immaginare che la detta curva si sposti da sinistra a destra colla velocità delle onde elettromagnetiche. Per l'indicata analogia colle onde noteremo che basta sostituire alla variazione di porzione dell'aria la forza elettrica, per passare dalla propagazione delle onde sonore a quella delle onde elettromagnetiche.

Fig. 508.

Poichè sappiamo che la scarica oscillante *ab* produce in un punto, oltre alla forza elettrica una forza magnetica (perpendicolare al piano di OO' ed *ab*, che è il piano di figura), una curva simile a quella della Fig. 508, ma tracciata in un piano perpendicolare al piano di figura ed avente per traccia su di essa la retta Ox, darà idea del modo nel quale è distribuita, ad un dato momento, la forza magnetica lungo la retta OO', ed il moto traslatorio da sinistra a destra di quella curva, che si può supporre connessa con quella tracciata nella figura, farà conoscere come varia la forza magnetica col tempo lungo la retta OO'.

È da notare che nelle precedenti considerazioni abbiamo fatto astrazione dallo smorzamento della oscillazione elettrica in *ab*, epperò le successive onde si consideravano tutte uguali. In realtà però lo smorzamento si produce.

È da notarsi inoltre che le due curve, quella tracciata nella Fig. 508 relativa alla forza elettrica e quella supposta in un piano perpendicolare relativa alla forza magnetica, devono supporsi fra loro connesse in modo che alle ordinate nulle dell'una corrispondano le massime dell'altra.**

§ 380. **La risonanza elettrica.** — Dicemmo nel § 256 del precedente volume in che cosa consiste il fenomeno della risonanza acustica. Sul conto delle condizioni di sua produzione si sa che:

1. La risonanza ha luogo nel modo migliore allorchè i periodi vibratori dei due corpi sonori sono rigorosamente uguali.

2. Se questa uguaglianza non è rigorosamente verificata, il secondo corpo sonoro può entrare tuttavia in vibrazione, ma il suono che emette è tanto più debole, quanto più differiscono i periodi vibratori dei due corpi.

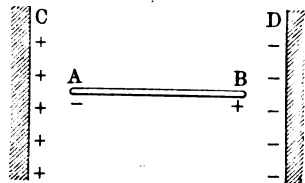
3. Quanto più persistenti sono le vibrazioni dei corpi sonori, e tanto più rigorosa deve essere l'uguaglianza di periodo. Quando, invece le vibrazioni si spengono rapidamente, cioè hanno forte smorzamento, il fenomeno di risonanza si produce quasi colla stessa intensità, sieno uguali i periodi vibratori o notevolmente differenti.

Come colle onde sonore si può produrre la risonanza acustica, colle onde elettromagnetiche si può produrre quella che si chiama *risonanza elettrica*.

La spiegazione della prima è la seguente. Quando un corpo vibra, genera nell'aria delle onde sonore sferiche. Se il corpo al quale arrivano le onde è capace di vibrare, e se il periodo delle sue vibrazioni è uguale a quello delle onde, si ha una somma degli effetti dei successivi impulsi che imprimono al corpo le vibrazioni e sul corpo si manifesterà un processo vibratorio.

Qualche cosa di analogo si avrà per il caso delle oscillazioni elettriche e delle onde che essi producono tutt'intorno e che raggiungano un sistema capace di diventar sede di oscillazioni elettriche con periodo determinato; giacchè il passaggio dell'onda consiste nel prodursi di forze elettriche e magnetiche alternative, con periodo uguale a quello dell'oscillazione elettrica generatrice di quelle onde.

Fig. 509.

Sia il conduttore rettilineo AB (Fig. 509) posto fra due grandi conduttori C e D paralleli ed oppostamente elettrizzati. Sopra A e B sorgeranno per influenza cariche opposte agli estremi ed opposte a quelle che stanno loro di fronte in C e D. Mettendo C e D in comunicazione si avrà nel sistema da essi formato a seconda dei casi o una scarica continua o una oscillante, e le cariche d'influenza in AB, dipendenti da quelle di C e D, subiranno vicende analoghe. Se la scarica fra C e D è oscillante, le cariche in AB dovranno obbedire alle oscillazioni del campo elettrico esistente fra C e D, pur tendendo in pari tempo ad obbedire a quel proprio periodo oscillatorio che si avrebbe se fosse possibile fare sparire istantaneamente le cariche influenzanti su C e D. Si dice che la oscillazione elettrica in AB è una oscillazione

forzata. Ma se si suppone che il periodo dell'oscillazione di scarica del sistema C e D sia uguale al periodo proprio di AB, le oscillazioni elettriche in AB acquisteranno la massima ampiezza e si avrà la *risonanza elettrica* fra il sistema C e D ed il conduttore AB.

Sopprimendo i conduttori C e D e facendo in modo che si determini intorno ad AB un campo elettrico oscillante dovuto ad onde elettriche generate da una scarica oscillante, se la frequenza di questa uguaglia quella con la quale si muoverebbe alternativamente una carica nel conduttore AB, si produrranno in questo delle oscillazioni elettriche.

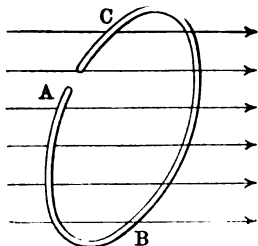



Fig. 510.

Analogamente, e come abbiamo ragionato sul conto di un campo elettrico oscillante, si può ragionare sul conto del campo magnetico oscillante che accompagna quello. Sempre ad un campo elettrico variabile, si associa un campo magnetico variabile; ma per il caso del campo elettrico oscillante abbiamo già veduta la cosa in modo esplicito e abbiamo anche veduto che tale legame persiste nel processo (onde elettromagnetiche) di trasmissione della perturbazione nello spazio.

Orbene, il campo magnetico oscillante dovuto al passaggio delle onde fa nascere delle correnti alternative in un circuito come ABC (Fig. 510), specialmente se il suo piano è normale alla direzione (rappresentata con frecce) del campo. Se il conduttore è interrotto fra A e C, le oscillazioni elettriche in esso, nel caso in cui il suo periodo sia uguale a quello delle onde, potranno assumere tale ampiezza da far nascere una scintilla nell'interruzione.

Il conduttore AB della Fig. 509 dicesi *risonatore rettilineo* ed a constatare che entra in azione giova una piccola interruzione che consenta la produzione di una scintilla. Anche il circuito quasi chiuso della Fig. 510 è un *risonatore*, e se ha la forma suppostagli nella figura stessa, è un *risonatore circolare*.

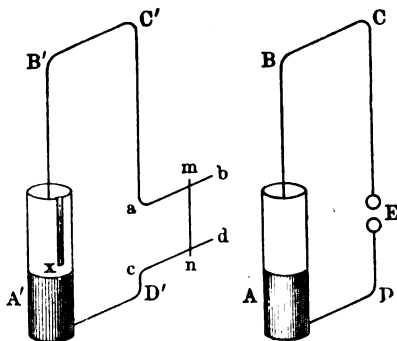
** Va notato che il risonatore rettilineo serve solo alle constatazioni relative alla forza elettrica, al che occorre che questa possa agire nella direzione stessa del risonatore.

Col risonatore circolare invece, oltre alle constatazioni relative alla forza magnetica, si possono fare quelle relative alla forza elettrica. Esso difatti assume oscillazioni anche per effetto della forza elettrica, quando questa possa agire nella direzione del diametro perpendicolare a quello passante per l'interruzione.

Dicemmo, a proposito della risonanza acustica, che non è indispensabile l'uguaglianza rigorosa fra il periodo delle onde e quello del risonatore, ed indicammo le condizioni di massima rispondenza. Analogamente per la risonanza elettrica la massima ampiezza d'oscillazione si produrrà nel risonatore, quando quell'uguaglianza si verifichi. L'influenza di una imperfetta uguaglianza di periodo è tanto meno sentita quanto più grande è lo smorzamento delle onde. Perciò quando si adoperano oscillazioni a smorzamento rapido, un risonatore di determinato periodo entra in funzione anche sotto l'azione di onde di periodo diverso.

Fig. 511.

Il fenomeno della risonanza può mettersi in evidenza colle bottiglie sintoniche di Lodge, le quali consistono in due condensatori AA' (Fig. 511) presso a poco di uguale capacità. Il primo A ha il circuito di scarica $ABCEDA$ interrotto da E. Il circuito che congiunge le armature del condensatore A' ha tal forma da poterne variare la autoinduzione mediante il terzetto mn che può spostarsi lungo ab e cd. Le correnti oscillanti provocate in una delle bottiglie (A') dalle onde elettromagnetiche emesse dall'altra (A) che viene caricata da una macchina elettrostatica o da un rocchetto di Ruhmkorff, hanno ampiezza massima per determinate condizioni della bottiglia stessa.

Le oscillazioni prodotte in questa nelle condizioni di risonanza sono messe in evidenza dallo scoccare, fra l'armatura esterna e l'estremo di una listerella di stagnola collegata all'armatura interna, di piccole scintille.**

§ 381. **Risonatore di Hertz - Onde stazionarie.** — Le considerazioni svolte nei due precedenti paragrafi furono applicate per prime da Hertz nella constatazione delle

onde elettromagnetiche prodotte da un eccitatore. L'apparecchio usato da Hertz come rivelatore di onde era un circuito, come quello rettangolare della Fig. 512 interrotto in M; ma più frequentemente come quello circolare della Fig. 513.

Alle estremità A, B corrispondenti all'intervallo erano fissati da una parte una pallina o un dischetto e dall'altra una vite acuminata, allo scopo di variare agevolmente la distanza esplosiva offerta ad una scintilla che ivi doveva scoccare durante il suo funzionamento.

Fig. 512.

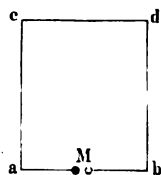
** Sia AB (Fig. 514) l'eccitatore, formato da due conduttori che ricevono cariche opposte da un rocchetto d'induzione o per modo che esso dia la scintilla oscillatoria, e si consideri un risonatore circolare collocato col suo centro in un punto R di una retta Ox perpendicolare ad AB, e orientato in varie maniere. Notando che in R la forza elettrica è diretta lungo FF' e la forza magnetica è perpendicolare al piano della figura, si ha che:

1. Se il risonatore è disposto secondo CD (col proprio piano, cioè perpendicolare ad AB) in esso non può agire nè la forza elettrica, che gli è perpendicolare, nè la forza magnetica, che dà per esso un flusso magnetico nullo; e quindi non si noteranno affatto scintille nella interruzione per quanto piccola essa sia.

Fig. 513.

2. Ponendo il risonatore secondo EG (col proprio piano cioè perpendicolare a quello della figura, ma insieme parallelo ad AB) la forza magnetica non può al solito agire su di esso, ma la forza elettrica si farà sentire al massimo quando l'interruzione si troverà ad uno degli estremi del diametro perpendicolare al piano della figura; non si farà sentire quando l'interruzione si troverà in E od in G; si farà sentire di meno in meno per posizioni comprese successivamente fra una delle prime ed una delle ultime. Corrispondentemente non si avranno, o si avranno col massimo effetto, o si avranno con manifestazione via via decrescente di intensità, le scintille di risonanza.

3. Se, il risonatore, è disposto come indica la circonferenza punteggiata nella Fig. 514, cioè col suo piano passante per AB, il flusso magnetico dovuto alla forza magnetica ha il massimo valore; e quindi si vedranno sempre le scintille di risonanza prodotte, o solo dalla forza magnetica o da questa e dalla forza elettrica, a seconda della posizione dell' interruzione. Se l'interruzione è in E od in G, la forza elettrica non produrrà nessun effetto; ma nelle altre posizioni, che si possono dare alla detta interruzione, la forza elettrica contribuirà al fenomeno. Qualora l'interruzione sia in C o in D, l'effetto sarà massimo.

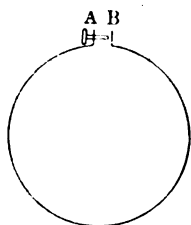



Fig. 514.

Usando il descritto risonatore si possono constatare i caratteri delle onde, previsti nel precedente paragrafo. Ma è anche possibile eseguire la esperienza delle onde stazionarie disponendo ad una certa distanza dall'eccitatore AB un'ampia lastra metallica ZZ perpendicolare ad Ox. Su questa lastra si rifletteranno le onde dirette da O verso x e si avrà la sovrapposizione delle onde dirette colle riflesse.

Fig. 515.

Tenendo il piano del risonatore normale ad Ox e la sua interruzione ad uno degli estremi del diametro perpendicolare ad Ox e ad AB (posizione in corrispondenza della quale non si sente affatto l'effetto della forza magnetica mentre si sente colla maggiore intensità quello della forza elettrica) si nota, che, collocando il risonatore nella immediata vicinanza della lastra ZZ e poi movendolo gradatamente lungo Ox da x verso O, dapprima resta inattivo e poi entra in funzione con formazione di scintille di più in più lunghe (il che si nota scostando la vite adattata ad un estremo dell'interruzione) sino ad un massimo per una posizione V_1.

Procedendo nello spostamento del risonatore le scintille mostrano una diminuzione graduale di lunghezza sino a non prodursi più in una certa posizione N_1. Poi ricompaiono per acquistare un massimo in V_2 per estinguersi in N_2, e così via. I punti x, V_1, N_1, V_2,... sono equidistanti e corrispondono alternativamente a nodi ed a ventri di un sistema di onde stazionarie dovute all'interferire delle onde dirette partenti dall'eccitatore colle corrispondenti onde riflesse. Delle onde irradiate dall'eccitatore si può così facilmente avere la lunghezza tenendo conto che la distanza fra due nodi o fra due ventri corrisponde a mezza lunghezza d'onda.**

Fig. 516.

§ 382. **Velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche.** — Siccome poi dalla misura delle dimensioni dell'eccitatore supposto di forma semplice (due sfere congiunte da un filo rettilineo interrotto nel mezzo) si può calcolare il periodo delle oscillazioni elettriche generanti le onde, in base alla formola nota $V = n\lambda$ si può constatare che le onde elettriche si propagono colla velocità della luce.

§ 383. ** **Riflessione nelle condizioni più generali.** - Hertz riuscì a produrre colle onde elettriche la riflessione nelle condizioni più generali e la rifrazione. A ciò valse molto l'idea di porre il suo oscillatore nel fuoco d'uno specchio parabolico (praticamente sferico o cilindrico), che (come uno specchio ordinario per una sorgente luminosa) permette di dirigere a distanza un fascio di raggi paralleli. Simile specchio si realizza colla lastra metallica MN applicata all'oscillatore O (Fig. 516). Questa lastra ha forma cilindrica colle generatrici parallele all'oscillatore e la sua sezione è sensibilmente un arco di parabola di cui l'oscillatore occupa il fuoco. Se il fascio di raggi di forza elettrica va a colpire una lastra metallica di SS si potrà constatare, mediante l'uso di un risonatore rettilineo R munito del riflettore, che si effettua la riflessione secondo le ordinarie leggi. Il fatto stesso, del resto, che funziona il riflettore nelle condizioni indicate per la trasmissione e per la recezione prova che valgono le leggi della riflessione.

Fig. 517. - L'oscillatore colla scatola avendo la superficie laterale flessibile.

Rifrazione. — Hertz mostrò dapprima questo fenomeno con un prisma di asfalto ed in seguito Lodge ed Howard raccolsero le radiazioni sopra una lente cilindrica piano-conversa di pece ed osservarono qualche indizio di convergenza operata dalla lente.**

§ 384. **Oscillatore e risonatore del Righi - L'ottica delle oscillazioni elettriche.** — La teoria del Maxwell richiedeva, per avere una larga sanzione, che si procedesse oltre nella produzione colle onde elettriche di tutti i fenomeni dell'ottica. E per provvedere oltre occorreva disporre di oscillazioni elettriche di più corto periodo di quelle ottenibili coll'eccitatore di Hertz che sono di troppo lungo periodo.

Fig. 518. - Una lamina di vetro argentata in *EFHG*, sulla quale si fa un sottile solco *LM* che interrompe l'argentatura. Tagliata in varie strisce fornisce tanti risonatori del Righi.

Con onde siffatte perchè la velocità di loro propagazione sia uguale a quella della luce, e perchè conseguentemente son molto lunghe, per riprodurre i delicati fenomeni dell'ottica fisica, occorrerebbero generalmente apparecchi di così grandi dimensioni da non essere praticamente realizzabili.

Per esempio, coll'oscillatore di Hertz capace di fornire le ondulazioni più rapide, si hanno oscillazioni la cui frequenza è di 500000000 al secondo. Ora, intendendosi per lunghezza d'onda il cammino percorso dalla perturbazione nel tempo di una oscillazione, se la velocità di loro propagazione è uguale a quella della luce, cioè di 300000 km. al secondo, la loro lunghezza d'onda sarà la cinquecentomilionesima parte di 300000 km. vale a dire 6 dm.

Si imponeva dunque, per avvalorare seriamente la ipotesi del Maxwell, la costruzione di nuovi oscillatori e risonatori rispondenti ai requisiti più sopra considerati. Il Righi, pel primo, in seguito ai vari tentativi fatti nel 1893, riuscì nell'intento.

Coi suoi apparecchi si ottenne la desiderata diminuzione della lunghezza d'onda, modificando la forma dell'oscillatore hertziano così da ridurne piccolissima l'autoinduzione. E si potè di più accrescere notevolmente l'intensità delle onde facendo scoccare la scintilla, che riunisce momentaneamente le due sfere dell'oscillatore, in un liquido isolante; poichè, per tal modo, si aumenta il potenziale di scarica e quindi anche la energia disponibile.

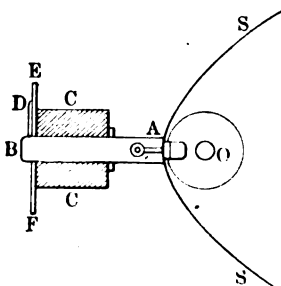



Fig. 519. - Sezione orizzontale della montatura di un oscillatore *O* con specchi *SS*.

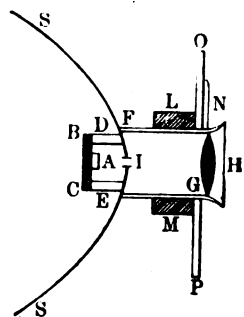



Fig. 520. - Sezione orizzontale della montatura di un risonatore *A* con specchio raccoglitore *SS* e con oculare *G*.

L'*oscillatore* Righi più usato (quello che venne applicato dal Marconi a costituire la parte essenziale del suo primo apparecchio trasmettitore) si riduce a due sfere massicce di rame, fissate nel centro di due grossi dischi di legno formanti le basi di un cilindro pieno di olio di vasellina, e le cui pareti laterali sono flessibili perchè costituite da una membrana (Fig. 517). A breve distanza dalle sfere stanno altre due sfere che si pongono in comunicazione cogli estremi del secondario di un rocchetto di induzione o coi due conduttori di una macchina elettrostatica. Di solito è collocato nella regione focale di uno specchio metallico parabolico (Fig. 519 e parte sinistra della Fig. 520).

Fig. 521. - Un altro oscillatore del Righi.

Mettendo in azione il rocchetto o la macchina, entra tosto in azione anche l'oscillatore con formazione di tre scintille, la media delle quali si produce nell'olio; e così si originano le onde. Le onde prodotte, come le onde elettriche in genere, non impressionano l'organo visivo. Basterebbe che diventassero più rapide, che le oscillazioni della scarica fossero in numero di circa 400 bilioni al secondo perchè si traducessero in luce rossa.

Il *risonatore* del Righi è costituito da una laminetta argentata di vetro nella cui argentatura è praticato una interruzione della estensione di due o tre millesimi di millimetro. Quando è attraversato dalle onde nasce nell'interruzione una scintillina che si osserva con una lente d'ingrandimento annessa alla montatura (Fig. 518 e 520).

** L'indole di questo libro non ci consente che di indicare per sommi capi i principali risultati che il Righi ottenne per primo, e che furono in seguito largamente confermati da altri fisici.

Interferenza. — Realizzò l'esperienza degli specchi di Fresnel, e molto bene, in virtù delle piccole onde delle quali disponeva. Per la differenza che corre sotto il punto di vista pratico fra l'esperienza ottica del Fresnel e quella analoga prodotta colle ondulazioni elettriche, fece riflettere le onde su due specchi formanti un angolo alquanto minore di 180°. Dopo aver collocato in opportuna posizione un grande schermo metallico capace di riparare dalle onde emesse dall'oscillatore, il risonatore, spostava questo lungo la regione di intersezione dei fasci interferenti e poteva così studiare le modalità del fenomeno.

Inoltre realizzò colle onde elettriche l'esperienza del biprisma del Fresnel e potè produrre l'interferenza nelle lamine sottili, che pel caso della luce dà, come dicemmo, uno dei più brillanti fenomeni, quello degli anelli colorati di Newton e conferisce alle bolle di sapone i loro ricchi colori.

Ma laddove in ottica una lamina per essere sottile deve avere uno spessore che si conti a millesimi di millimetro; nel campo dell'elettricità, disponendo di lunghezza d'onda 10000 o 500000 volte più grandi, una lastra, per il fenomeno che consideriamo,

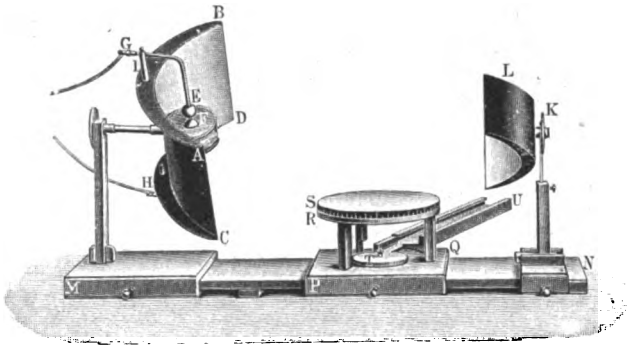
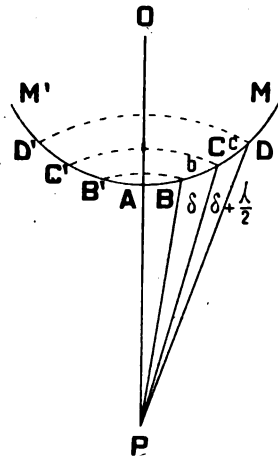



Fig. 522. - L'oscillatore del Righi ed il corrispondente risonatore montati nell'asse focale di due specchi metallici parabolici. Servono ad eseguire tutte le esperienze dell'ottica delle oscillazioni elettriche. Per analogia colla locuzione usata pel dispositivo del Melloni, si potrebbe questo assieme chiamare *banco del Righi.*

sarà sottile con uno spessore più grande. Il Righi, che ottenne il fenomeno nel modo più netto e deciso, fece uso di lamine di paraffina e di zolfo grosse all'incirca e rispettivamente cm. 2, 1 ed 1, 5.

Diffrazione. — I fenomeni di diffrazione, sono stati messi in evidenza in modi diversi.

Il Righi, richiamando la graduazione dell'onda alla quale si ricorre nella nota spiegazione elementare dei fenomeni di diffrazione luminosa, ha realizzata la divisione di un'onda in elementi. Segnò di un arco (sul cui centro O doveva porsi, verticalmente a circa mezzo metro d'altezza, l'eccitatore) alla destra del suo punto medio A, i punti B, C, D, ... tali che le loro distanze da P (punto sul quale, verticalmente ed alla terza altezza dell'eccitatore, doveva porsi il risonatore), posto sulla stessa retta con A e con O e tale che PA fosse uguale a 65 cm. mentre OA era di 75, superassero successivamente PA di una, due, tre ... mezze onde; e sulla sinistra di A' i punti B', C', D' ... determinati nella stessa maniera. Dispose quindi l'eccitatore ed il risonatore nei posti fissati, e coprendo con diaframmi di zinco alti circa un metro gli elementi di ordine pari 2, 2', notò aumento di intensità in P, aumento il quale cresceva se si ponevano diaframmi in 4 e 4'.

Fig. 523.

Ma mise anche in evidenza la diffrazione prodotta da una fenditura. Notò difatti che ponendo diaframmi convenienti negli elementi d'onda si ha, in corrispondenza del mezzo della fenditura, intensità massima o minima secondo che la fenditura lascia libero sull'onda un numero dispari o pari di elementi, e che ai due lati di quel massimo o minimo, ad ugual distanza dell'eccitatore, esistono rispettivamente due minimi e due massimi ai quali seguono poi altre alternative di intensità. La posizione dei minimi sono sensibilmente quelle per cui relativamente ad esse si trovino circa due soli elementi liberi dell'onda da una parte del rispettivo polo, e circa quattro dall'altra. Così, per le posizioni dei secondi massimi, rimane circa un solo elemento da una parte del polo, e circa cinque dall'altro.

Del pari riprodusse i fenomeni di diffrazione dovuti all'orlo di un corpo opaco.

Rifrazione. — Il Righi, riprodusse la rifrazione attraverso ad un prisma servendosi di un prisma non più grande di quelli che si adoperano in ottica, mise in evidenza lo spostamento per il passaggio delle onde attraverso ad un blocco di paraffina a facce parallele, ed infine potè riprodurre gli effetti delle lenti ed imitò il fenomeno ottico delle pile di lastre.

Riflessione totale. — Il Righi ha potuto produrre questo fenomeno in modo evidentissimo con prismi dielettrici a sezione rettangola, ed imitando con lunghe colonne dielettriche il fenomeno delle fontane luminose.

Doppia rifrazione. — Il fenomeno della doppia rifrazione fu ottenuto per la prima volta dal Righi con lamine di legno.**

§ 385. ** **Polarizzazione delle onde elettriche.** — Abbiamo veduto come le onde luminose si possano polarizzare. Per tutto quanto si è detto sul conto delle onde elettriche, è evidente che esse in virtù del modo stesso di loro produzione, sono necessariamente polarizzate. Dal modo poi secondo cui si effettua la riflessione di tali onde, risulta che, delle due vibrazioni, l'elettrica e la magnetica, è la prima l'analoga alla vibrazione considerata in ottica, e supposta normale al piano di riflessione quando la luce vien polarizzata per mezzo di uno specchio.**

§ 386. **La sensibilità dell'arco elettrico - L'arco cantante ed il dispositivo di Poulsen.** — Il prof. Simon scoprì sino dal 1897 che una lampada ad arco riproduceva esattamente il rumore di un rocchetto d'induzione agente in una camera lontana. Il filo conduttore della corrente indotta era per breve tratto parallelo a quello attraversato dalla corrente alimentatrice dell'arco, per cui apparve naturale attribuire il fenomeno ad una notevole sensibilità dell'arco per le variazioni di corrente determinate dalle correnti indotte dal secondario del rocchetto sul circuito dell'arco.

Quanto al meccanismo del fenomeno sembrò migliore fra tutte la spiegazione seguente.

Ciascuna corrente indotta che si sovrappone alla continua alimentante dell'arco la rinforza e la indebolisce alternativamente determinando nella massa gassosa incandescente costituente l'arco accrescimenti e diminuzioni di temperatura e di volume. Queste variazioni si comunicano all'aria circostante e se sono molto rapide vi si fanno intendere come suoni. Si traducono altresì in variazioni di luminosità apprezzabili direttamente od indirettamente.

Fig. 524.

I numerosi e vari studi che si fecero sull'arco cantante portarono a modificazioni varie di questa disposizione iniziale del Simon ed alla scoperta di varie manifestazioni dell'arco dipendenti dalla sensibilità sua. Notevole è la seguente, scoperta dal Duddell, e tale da permettere la generazione di onde elettriche.

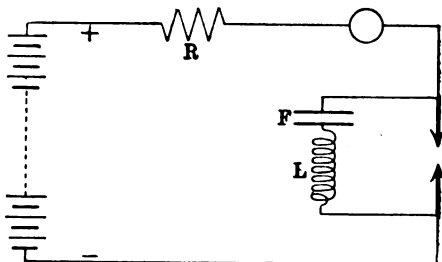
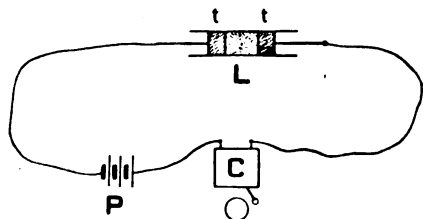
Se su di un arco voltaico (Fig. 524) si pone in derivazione un rocchetto *L* dotato di conveniente autoinduzione ed un condensatore *F* dotato di conveniente capacità, di continuo che era l'arco diventa rapidamente oscillante e dà origine tutt'intorno ad onde elettriche. Duddell non potè avere più di 30000 vibrazioni al secondo ma il Poulsen producendo convenientemente l'arco invece che nell'aria libera in atmosfera di idrogeno e di idrocarburo, potè arrivare a 500000 vibrazioni al secondo.

§ 387. **I radioconduttori.** — Altra maniera per rivelare le onde elettriche, utile però solo in casi particolari, è quella di ricorrere ai radioconduttori o *coherers.*

Fig. 525.

Il primo tipo di *coherer* (Fig. 525) dovuto agli studi del prof. Calzecchi Onesti, del Branly, e del Lodge, è un tubettino di vetro contenente limatura *L* di ferro o di nichel o una mescolanza di queste o di altre polveri. È chiuso da due tappi *tt* attraversati da fili metallici che all'estremità interna sono saldati a due dischi pure metallici limitanti alla limatura. Il sistema gode di questa proprietà che nelle condizioni ordinarie non conduce la corrente; ma quando venga investito da un'onda elettrica diventa conduttore per riacquistare la resistenza primitiva quando venga urtato con un piccolo colpetto. Nelle condizioni ordinarie, per la resistenza opposta del *coherer*, la pila *P* del circuito della Fig. 525 nel quale è inserito anche un *coherer* ed un campanello elettrico *C*, non lancierebbe corrente nel circuito e quindi il campanello non suonerebbe. Ma se

sul *coherer* si fa passare un'onda col porre in azione a distanza non troppo grande un oscillatore, esso diverrebbe tosto conduttore e la corrente si stabilirebbe facendo suonare il campanello. Ogni volta che il *coherer* è investito da un'onda diventa conduttore e mantiene la conducibilità finchè non venga percosso. Questo tipo di *coherer* vien detto *a diminuzione di resistenza* per distinguerlo da un altro tipo detto *ad aumento di resistenza* nel quale invece le onde elettriche determinano un aumento di resistenza.

Va fatta a proposito dei radioconduttori un'altra distinzione in *autodecoerabili* ed in *non autodecoerabili* a seconda che non richiedono o richiedono un'azione esteriore per riportarsi alle condizioni primitive dopo l'azione su di essi delle onde. Il *coherer* descritto è non autodecoerabile perchè richiede per ritornare nelle condizioni primitive una piccola percussione. È ovvio che tale percussione conviene che sia automatica. A tal fine basta disporre le cose in modo che la corrente stessa circolante nel circuito animi una elettrocalamita per ottenere da questa un qualunque effetto meccanico, ed in particolare, coll'àncora dell'elettrocalamita medesima, un colpetto sul tubo a limatura.

La corrente che si suscita colle onde nel circuito ricevente è necessariamente debole per la sensibilità del *coherer*, ma può mettere a nostra disposizione la corrente della maggiore intensità da noi desiderata. A tal fine serve un *soccorritore* o *relais* di uso frequente anche nella telegrafia ordinaria, che attraversato dalla debole corrente indicata, chiude un circuito con una pila la quale dà una corrente sufficientemente intensa per il buon funzionamento o del campanello o di ciò che ne tiene il posto, come, ad esempio, un apparecchio di telegrafia ordinaria.

Con un sistema disposto in questo modo si ottiene evidentemente questa azione soltanto durante il tempo in cui si mantiene premuto il tasto.

§ 388. **Altri rivelatori - Classificazione dei rivelatori.** — Oltre ai risonatori ed ai radioconduttori o *coherers* esistono molti altri rivelatori di onde elettriche, di alcuni dei quali daremo qui un rapido cenno.

** *Rivelatore magnetico o detector magneticum, Marconi.* — È costituito (Fig. 526)

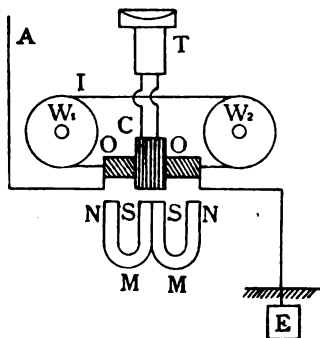



Fig. 526.

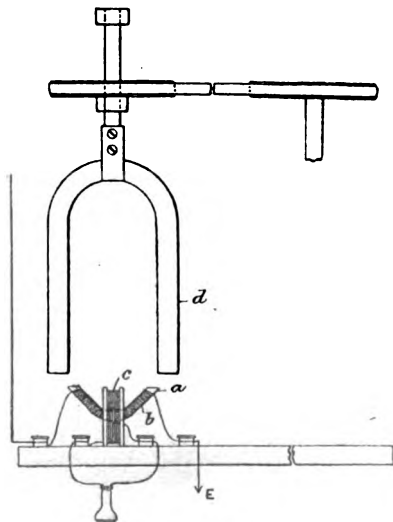



Fig. 527.

da un fascetto di fili di ferro o d'acciaio avvolto su due puleggie W_1 e W_2 mediante le quali è mantenuto in un lento movimento alla guisa di una cinghia di trasmissione, sul quale sono disposti due avvolgimenti, l'uno OO a filo grosso e con un piccolo numero di spire connesso alla terra E e all'antenna A, l'altro C a filo fino e con numero rilevante di spire collegato co' suoi capi a quelli di un telefono T. Il fascetto è disposto in un campo magnetico che varia periodicamente e lentamente, quale per esempio si ottiene mediante la rotazione di una calamita permanente. Nel sistema della figura è ottenuto con due calamite a poli omonimi in contatto. Per un noto fenomeno detto di *isteresi*, in tali condizioni lo stato magnetico del fascetto ritarda su quello del campo magnetizzante.

Le correnti oscillanti prodotte nel primo avvolgimento delle onde che investono l'antenna sopprimono bruscamente tale ritardo, permettendo un rapido avanzamento allo stato

magnetico del fascetto, con che si ha una brusca variazione nel flusso magnetico abbracciato dal secondo avvolgimento, il quale perciò diviene sede di correnti abbastanza intense per dare al telefono un rumore percettibile.

Altra disposizione di *detector* sostanzialmente identica alla precedente è rappresentata dalla Fig. 527; *a* è un fascio di fili di ferro, piegato ad *U* molto aperto colle estremità rivolte in alto.

Attorno al fascio sono avvolti due o tre strati di filo di rame isolato colle estremità congiunte l'una all'antenna e l'altra alla terra; *c* è un rocchetto di filo più grosso di quello precedente. Al disopra delle estremità del fascio *a* si trovano i poli di una calamita permanente a ferro di cavallo la quale è mantenuta in rotazione attorno ad un asse verticale.**

Rivelatore elettrolitico. — È costituito da un recipiente di vetro nel quale è contenuta una soluzione acquosa di acido solforico. Entro questa soluzione sono collocati due elettrodi, uno costituito da una lamina di piombo e l'altro da un sottile filo di platino che attraversa il fondo di un tubo di vetro e al quale si fa contatto mediante mercurio collocato nel tubo. Una corrente elettrica in questo particolare voltametro non passa che dal platino al piombo attraverso alla soluzione ed il voltametro può quindi servire a separare le fasi di un medesimo senso delle onde corrispondenti ad un determinato gruppo di onde investitore. Bisogna però adoperare una pila il cui polo positivo sia collegato alla punta di platino ed il cui polo negativo sia collegato attraverso ad un ordinario telefono, alla lamina di piombo. In queste condizioni la corrente della pila tende a decomporre l'acqua del voltametro e si forma subito una bolla gassosa microscopica attorno alla punta di platino che impedisce l'ulteriore passaggio della corrrente. La corrente però passa in corrispondenza dell'arrivo di un onda o di un gruppo di onde. Al telefono si sente corrispondentemente un rumore che dura quanto l'azione delle onde.

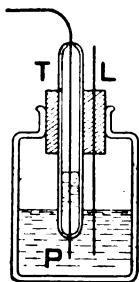



Fig. 528.

Rivelatori a gas ionizzato. — Sono basati sul fenomeno di Edison consistente nel fatto che il filamento di una lampada elettrica ad incandescenza (specialmente se fatto con tantalio o tungsteno) emette elettroni negativi che si possono raccogliere su una lamina metallica parallela al filamento e sostenuta da un filo conduttore attraversante la lampada. La corrente unilaterale che così può realizzarsi viene rinforzata dalle semi-onde di un determinato senso che appartengono ad un gruppo di onde investitore della lampada o rivelatore. Sono di questo tipo la valvola Fleming e l'*audion* De Forest.

Rivelatore a cristallo. — È costituito da un contatto fra una punta di platino ed un cristallo (carborundum, galena, molibdenite, pirite ecc.), che godendo della conducibilità unilaterale lascia passare solo le semi-onde di un determinato senso appartenenti ad un gruppo di onde investitrici, e tali semi-onde posson agire direttamente in un telefono o fare agire in questo la corrente di una pila ausiliaria.

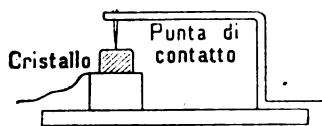



Fig. 529.

Classificazione dei rivelatori. — Sul conto dei vari rivelatori di onde elettromagnetiche è il caso di dire come essi si distinguano in tre classi:

1. Rivelatori che utilizzano principalmente l'ampiezza massima dell'onda incidente, detti perciò *rivelatori di ampiezza.* Tali sono i *coherers* ed il *detector magnetico.*

2. Rivelatori integratori o *di energia* che utilizzano tutte o gran parte delle oscillazioni incidenti (Rivelatori a gas ionizzato e forse quelli a contatto solido).

3. Rivelatori misti il cui funzionamento dipende, sia dall'ampiezza massima delle onde, sia dalla loro energia totale (Rivelatori elettrolitici).

§ 389. **Il telegrafo senza filo.** — Guglielmo Marconi applicò le onde elettriche alla trasmissione telegrafica, inventando il cosidetto *telegrafo senza filo.*

Il telegrafo senza filo di Guglielmo Marconi nella primitiva disposizione, la sola della quale diamo qui descrizione, è costituito di due apparecchi: uno trasmettente e l'altro ricevente, senza legami materiali intermedi.

L'apparecchio *trasmettitore* (Fig. 530 e 531) comprende un trasformatore di Ruhmkorff nel cui circuito primario sta una pila ed un tasto telegrafico, ed il cui secondario adduce ad un oscillatore Righi, da una parte in comunicazione con una lastra metallica o con

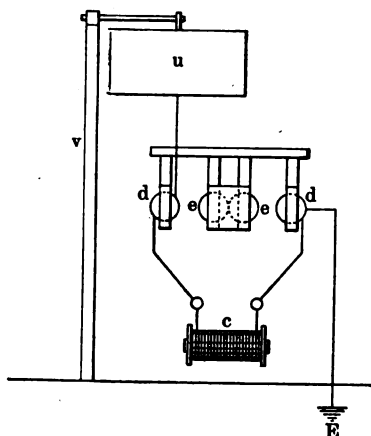
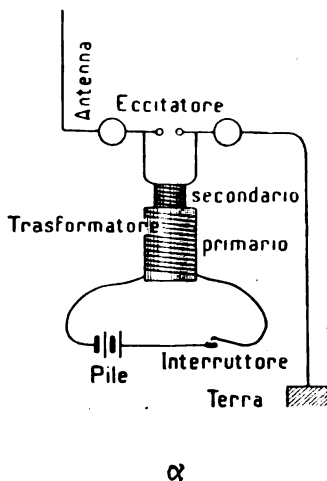



Fig. 530. *Fig. 531.*

un'asta metallica verticale (*antenna* od *aereo*) e dall'altra in comunicazione col suolo.

L'apparecchio *ricevente* (Fig. 532) è costituito da due circuiti concatenati fra loro mediante un soccorritore. In uno di essi ($T \times Q$) si trova una pila, parte del soccorritore, ed il *coherer*, un estremo del quale comunica con un'antenna verticale e l'altro

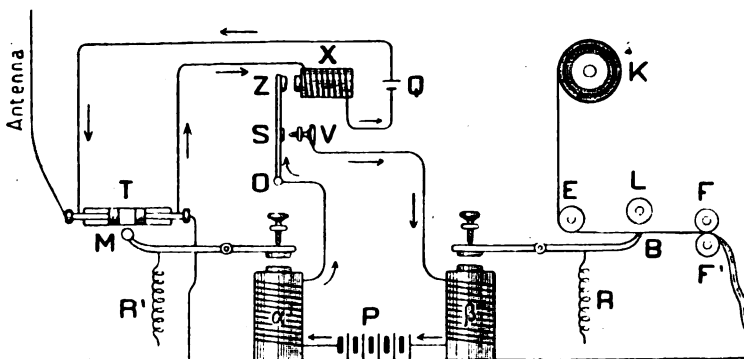



Fig. 532.

col suolo. L'altro circuito (*OSVP*) comprende parte del soccorritore, la pila locale P e l'apparato Morse. Su quest'ultimo circuito si trova poi applicata l'elettrocalamita α azionante il martellino percuotitore M del *coherer*.

Premendo per un breve istante il tasto dell'apparecchio trasmettitore si generano onde, che impressionando il *coherer* dell'apparecchio ricevente lo rendono conduttore. Per tal modo si mette in azione per un attimo l'apparecchio Morse, e subito il tubetto a limatura viene percosso e riacquista la resistenza primitiva. Sulla zona dell'apparato Morse viene quindi segnato un punto.

Premendo invece per un tempo breve ma non istantaneo il tasto trasmettente, si ottiene sulla zona una linea.

È quindi possibile servirsi dello stesso alfabeto Morse che serve nella telegrafia ordinaria.

L'arrivo delle onde, anzichè da un apparecchio telegrafico, può essere rivelato dal rumore emesso da un telefono che sostituisca il soccorritore (Fig. 536).

** I caratteri del nostro studio ci impongono di limitare le nostre indicazioni sul telegrafo senza filo al semplice dispositivo al quale più sopra ci siamo riferiti. Gli impianti radiotelegrafici hanno però oramai raggiunto tale sviluppo e tale portata che nelle stazioni di piccola e media portata si mettono in esercizio, alla trasmissione, potenze di alcune decine di *chilowatt*, mentre nelle grandi stazioni si usano centinaia di *chilowatt*. I semplici trasformatori o rocchetti Ruhmkorff sono stati sostituiti da trasformatori, alternatori e dinamo di grande potenza. La semplice primitiva antenna è diventata nelle grandi stazioni un sistema di centinaia di fili conduttori disposti variamente e sostenuti da grandi torri metalliche (Fig. 533).

Fig. 533. - Alcune forme di *antenne*.

Le onde fornite dall'oscillatore direttamente collegato coll'antenna (trasmissione diretta, o in *pieno aereo*) nel modo indicato vengono emesse a gruppi in ciascuno dei quali le onde medesime hanno bensì tutta la medesima lunghezza, ma hanno le ampiezze decrescenti rapidamente: sono tali onde fortemente *smorzate*.

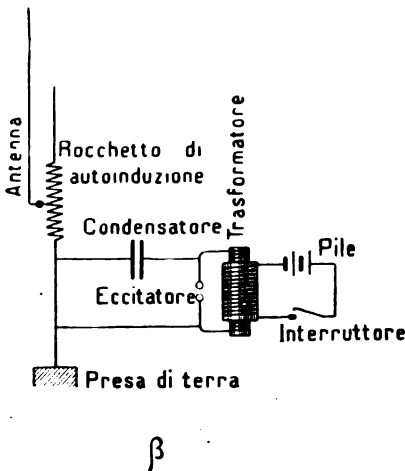
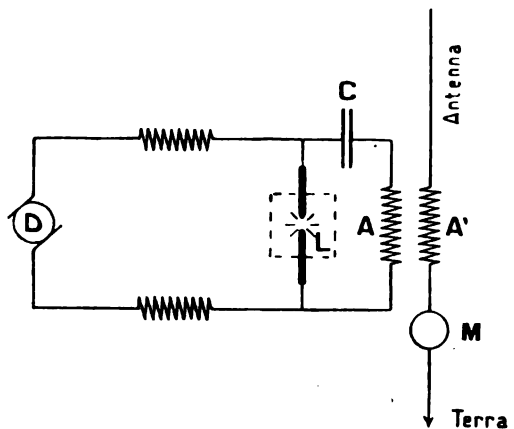



Fig. 534.

Fig. 535.

Esse possono servire in certi casi come quando importa di farsi sentire dal maggior numero possibile di stazioni. Tale è il caso di una nave in pericolo: qualunque sia la lunghezza d'onda sulla quale sieno accordate le stazioni comprese entro un certo raggio di azione, intenderanno la chiamata.

Nella trasmissione ordinaria però le onde a rapido smorzamento non vanno bene, sia per una quistione inerente al quantitativo di energia che mettono in moto, sia per lunghi intervalli di inattività del ricevitore durante la trasmissione. Si è quindi pensato da tempo a rallentare lo smorzamento delle onde emesse da un oscillatore a scintilla (o, come si dice, ad *onde intermittenti*). Giova a tal fine una trasmissione indiretta quale viene schematicamente rappresentata dalla Fig. 534, o altre analoghe.

Si usano più largamente dispositivi nei quali l'oscillatore funziona in modo da dare di per sè delle onde a lento smorzamento, un oscillatore ad *onde persistenti*, come si dice. Un esempio di siffatti oscillatori si ha nell'arco oscillante descritto nel § 386, adattato in un dispositivo di trasmissione ad antenne, come è indicato schematicamente dalla Fig. 535.**

§ 390. **Telemeccanica senza filo.** — Poichè l'impiego di un radioconduttore permette di chiudere, con una emissione di onde elettriche, il circuito di una pila, si possono realizzare a distanza tutti gli effetti della corrente elettrica e coll'intermediario di elettrocalamite, le azioni meccaniche più svariate. Si rende cioè possibile la cosidetta *telemeccanica senza filo*, la produzione cioè a distanza senza intermediari materiali di azioni meccaniche anche notevolissime.

Se i circuiti relativi a differenti effetti che si vogliono realizzare sono stati predisposti, nella stazione ricevitrice, ciascuno munito del proprio radioconduttore, una medesima scintilla della stazione trasmettente chiude tutti i circuiti e realizza simultaneamente tutti gli effetti.

§ 391. **Telefonia per onde elettriche.** — La telefonia per onde elettriche che ha dato buoni risultati specialmente con dispositivi e in esperienze degli italiani Maiorana,

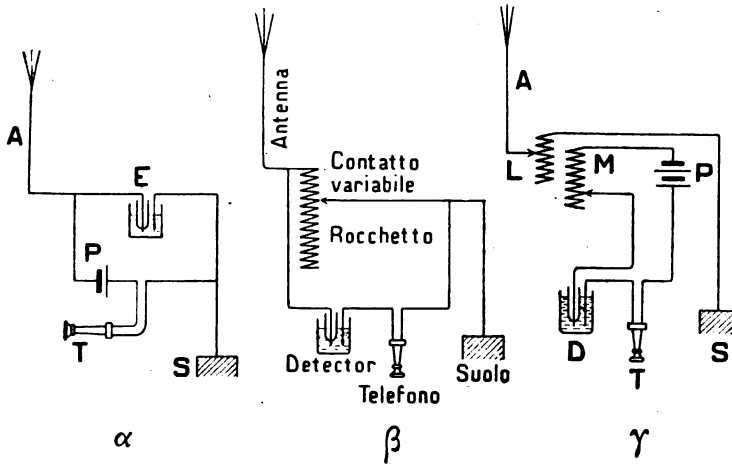



Fig. 536. - Varie disposizioni per la recezione.

Vanni e Moretti, richiede che una emissione di onde persistenti (quali si possono ottenere con un arco oscillante) venga modificata in corrispondenza della modulazione della voce da trasmettere. A questo serve un conveniente microfono collocato nel circuito dell'antenna trasmettitrice. Nell'apparecchio ricevente, che sostanzialmente è uguale ad una stazione ricevitrice di telegrafia senza filo, si usa di preferenza come rivelatore un rivelatore a gas ionizzato. La trasmissione, in prove assai lusinghiere, ha potuto farsi felicemente fra Roma e Tripoli e fra Roma e Treviso.

CAPITOLO XLI.

FOTOTELEFONIA.

§ 392. **La sensibilità del selenio per la luce.** — Willoughby Smith, in causa della debole conducibilità elettrica del selenio cristallino (ottenuto scaldando a temperatura conveniente e con procedimento opportuno quello amorfo), aveva pensato di poterlo impiegare con vantaggio a costruire delle forti resistenze in certe sue esperienze su cavi sottomarini. La resistenza di talune sbarre di selenio raggiungeva perfino i 1400 megaohm, precisamente come un filo telegrafico che congiungesse la Terra al Sole.

Ma si riconobbe presto che tali resistenze hanno valore estremamente variabile colla loro illuminazione. Fortemente più piccola era la resistenza nel selenio illuminato che non nel selenio mantenuto all'oscuro. Tale effetto prodotto dalla luce può facilmente dimostrarsi (Fig. 537) per mezzo di una resistenza R formata con un po' di selenio cristallino

cui sieno incorporati a qualche distanza due elettrodi metallici inseriti con un galvanometro G nel circuito di una conveniente batteria P: la deviazione galvanometrica cresce illuminando il selenio.

Fig. 537.

§ 393. **Le cellule a selenio.** — Il selenio disposto in guisa che sia facile mostrare in esso la proprietà ora indicata, viene a costituire col proprio sostegno immediato una *cellula* o *cella*. La denominazione è senza dubbio impropria e potrebbe opportunamente sostituirsi coll'altra di *resistenza a selenio* consigliata dal Minchin; senonchè essa è generalmente adottata.

Al fine di ottenere che la resistenza di una cellula a selenio abbia un valore non troppo elevato e la luce vi possa produrre l'effetto massimo, conviene soddisfare tre condizioni principali. Gli elettrodi debbono essere il più che possibile ampli, il più che possibile vicini e debbono comprendere uno strato molto sottile di selenio. Da ciò le varie forme di cellule intese a soddisfare nella maniera migliore queste condizioni ed a raggiungere quindi il maggior grado di sensibilità.

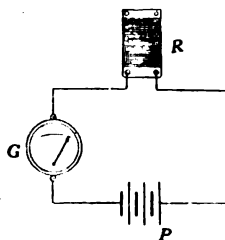
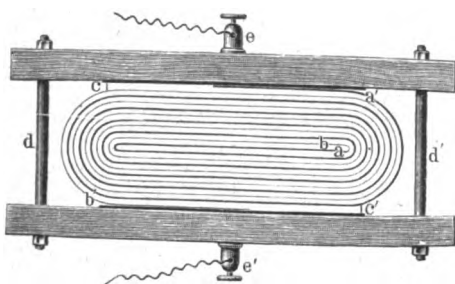



Fig. 538.

La cellula ideata e felicemente adoadoperata dal Mercadier si riduce a due sottili nastri aa' e bb' di rame, separati da un nastro simile di carta, arrotolati con questo, come mostra la Fig. 538 e mantenuti ben compressi da un opportuno telaio. Anche qui, su una faccia ben limitata e pulita viene, alla temperatura conveniente, collocato il selenio sensibile. Shelford Bidwell, a costituire una cella, disponeva un doppio filo di rame o di altro metallo su di un pezzo isolante di vetro, di lavagna, di mica o di porcellana, indi, alla temperatura conveniente, collocava sul sistema il selenio in strato molto sottile così da formare con esso un ponte fra l'un filo e l'altro. Il Ruhmer costruisce le cellule, che pone in commercio e che sembrano le più usate, in una maniera del tutto simile a questa di Bidwell. In più egli monta le cellule stesse come le lampade ad incandescenza (Fig. 539) entro un globo di vetro nel quale opera la rarefazione dell'aria. Per tal modo il sistema è molto bene maneggevole e non risente l'influenza nociva dell'umidità.

Fig. 539.

§ 394. **Il fotofono.** — L'azione della luce sul selenio cristallino grigio può mettersi in evidenza altrimenti che nei modi finora considerati. Graham Bell pensò di valersi di un telefono, incluso (Fig. 540) nel circuito di una conveniente pila, con una cellula a selenio sulla quale si faceva cadere un raggio di luce periodicamente interrotto mediante un disco forato ed animato da un rapido movimento uniforme di rotazione. Al telefono si percepiva così un suono tanto più acuto quanto più rapido era il moto rotatorio del disco.

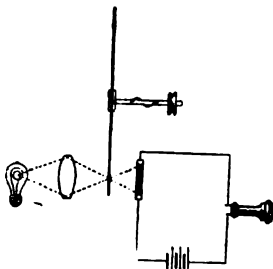



Fig. 540.

Dimostra assai bene e la utilizza la proprietà del selenio il fotofono di Bell che fece a suo tempo parlare tanto di sè, eccitando molte speranze e sbrigliando non poca fantasia.

Il fotofono permetteva, non solo — come si disse — di far parlare un raggio di luce, ma di trasmettere colla luce la vera e propria parola articolata.

Semplicissima è la costituzione di un tale apparecchio; che si compone di un trasmettitore e di un ricevitore. L'apparecchio trasmettitore si riduce (Fig. 541) ad un piccolo padiglione vocale A sul cui fondo è disposta una laminetta di mica argentata in modo da conferirle un buon potere riflet-

tente. L'apparecchio ricevente è costituito da uno specchio parabolico rivolto verso il trasmettitore e nel cui fuoco sta una cellula a selenio inclusa con un telefono nel circuito di una conveniente pila. Parlando contro il trasmettitore *A*, mentre sulla mica riflettente giunge obliquamente un fascio di raggi intesi e paralleli che dopo la riflessione si dirigono verso lo specchio della stazione ricevente, nella cellula disposta sul fuoco di questo specchio, per le varie curvature assunte dalla lastra di mica assoggettata alle dirette vibrazioni sonore, i raggi di luce si concentrano variamente inducendone diverse variazioni di resistenza elettrica. Tali variazioni corrispondendo fedelmente alle diverse e successive variazioni impresse alla lamina del trasmettitore *A*, reagiscono sul telefono in modo da farvi intendere chiaramente il suono emesso di fronte ad *A*. È superfluo avvertire che l'apparecchio di Bell, per quanto ingegnoso e contenente in germe un telefono senza fili sufficientemente pratico venuto poi dopo, non risolveva il problema della trasmissione ad una sensibile distanza della parola mediante la luce.

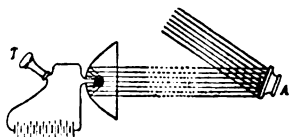



Fig. 541.

§ 395. **La fototelefonia coll'arco elettrico.** — Recentemente per la trasmissione del suono mediante la luce si è ricorso alla sensibilità dell'arco elettrico della quale parlammo già nel § 386.

Il Simon difatti, valendosi di tale sensibilità da lui scoperta e della nota proprietà del selenio cristallino di variare la propria resistenza elettrica al variare del grado di sua illuminazione, realizzò una disposizione semplice atta a trasmettere a distanza il suono per mezzo della luce. Una batteria di accumulatori alimenti (Fig. 542), attraverso il secondario di un trasformatore, un arco voltaico munito di riflettore. Il primario del trasformatore sia nel circuito di una pila conveniente con un microfono. A distanza, nel fuoco di uno specchio parabolico, sia disposta una cellula a selenio (Fig. 543) facente parte, con un telefono, di un circuito elettrico conveniente. Se il riflettore e lo specchio parabolico, pur a grande distanza reciproca, sono affacciati l'un l'altro, parlando di fronte al microfono, si vengono

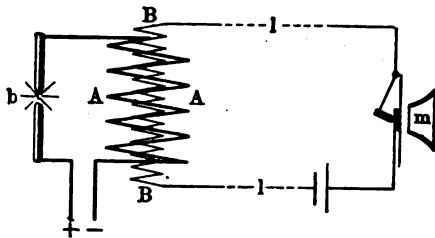



Fig. 542.

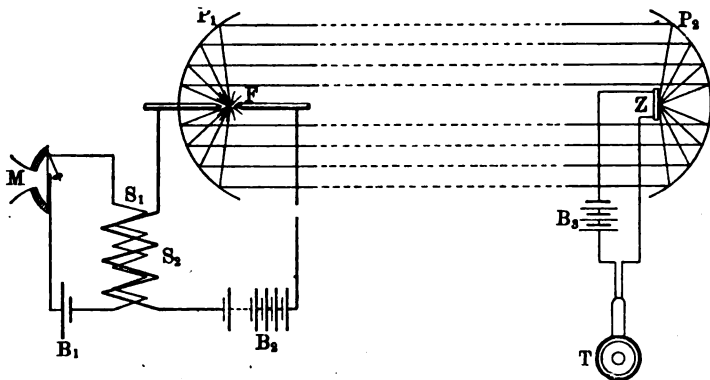



Fig. 543.

a creare nel secondario del trasformatore delle correnti indotte, che, sovrapponendosi alla corrente continua dell'arco, faranno corrispondentemente variare la luminosità di questo. Queste variazioni, ripercuotendosi sulla cellula a selenio, ne varieranno la resistenza elettrica mettendo così in azione il telefono.

PARTE QUARTA

CENNI DI METEOROLOGIA

CAPITOLO XLII.

GENERALITÀ - PROPRIETÀ MECCANICHE E FATTI TERMICI DELL'ATMOSFERA.

§ 396. **La meteorologia.** — La meteorologia si occupa dei fenomeni fisici che si producono nell'atmosfera e che per questo si dicono fenomeni meteorologici od atmosferici.

§ 397. **Elementi meteorologici, loro variazioni e loro rappresentazione grafica.** — Per studiare la meteorologia bisogna seguire i valori di quegli elementi, detti *meteorologici*, quali la temperatura dell'aria, la pressione atmosferica ecc.

La cognizione del valore di questi elementi per i vari luoghi della superficie della Terra giova a fissare i caratteri del *clima* di questi luoghi, intendendosi per clima di un luogo l'insieme di quelle condizioni meteorologiche che rendono più o meno bene abitabile quel luogo.

Questi elementi si studiano separatamente, ma più che considerare il loro valore assoluto bisogna considerare le loro *variazioni*. Queste variazioni possono essere o *periodiche* o *irregolari*. Se consideriamo la temperatura di una giornata in diverse ore si può riconoscere che dalla levata del Sole cresce gradatamente fino a raggiungere un *massimo* (circa alle ore 14) per poi decrescere fino a raggiungere un *minimo* poco dopo del levar del Sole. Questa variazione che si riscontra giornalmente è una *variazione periodica*.

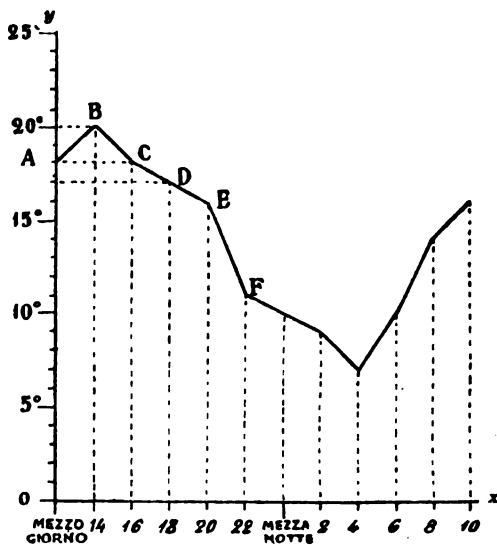
Le variazioni periodiche possono riferirsi ad intervalli diversi di tempo ed essere perciò *diurne, mensili, annue* ecc.

Le altre variazioni dette *irregolari* o *perturbazioni* si producono in un senso o nell'altro e ad epoche qualunque, o almeno nelle quali non si è ancora riconosciuta periodicità alcuna. Queste perturbazioni vengono spesso a turbare e spesso a mascherare completamente la regolarità delle variazioni periodiche.

Per effetto di queste multiple variazioni irregolari l'andamento degli elementi diventa spesso troppo complesso, perchè sia possibile uno studio immediato e chiaro.

Fig. 544.

Le variazioni di questi elementi meteorologici si possono rappresentare mediante diagrammi. Riferiamoci come esempio al caso dell'elemento temperatura, intendendo di dare al nostro ragionamento un carattere di generalità per gli altri elementi meteorologici.

Tracciamo (Fig. 544) un sistema di due assi ortogonali (xy). Rappresentiamo con un certo segmento l'intervallo di un'ora, e con un altro segmento l'intervallo di un grado centigrado.

Innalzando tanti segmenti paralleli all'asse y, che ci rappresentino con la loro lunghezza le temperature osservate nei tempi espressi dai rispettivi punti di x e congiungendo le estremità di questi segmenti, otterremo una *linea che ci rappresenta graficamente l'andamento della temperatura nell'intervallo di tempo in cui abbiamo fatto le osservazioni.*

§ 398. **Media - Metodi di media.** — Interessa in meteorologia la considerazione delle medie dei valori assunti da un certo elemento entro un certo intervallo di tempo.

Per la temperatura, ad esempio (e ciò che si dice per la temperatura vale per ogni altro elemento) *la media è data dall'altezza di un rettangolo di area equivalente a quella del poligono mistilineo, che è chiuso in alto dalla linea che rappresenta l'andamento della temperatura nell'intervallo di tempo considerato* (Fig. 545).

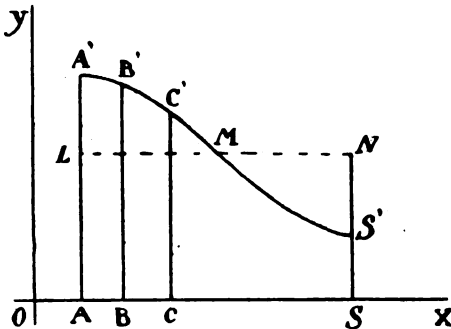



Fig. 545.

Questa media si ottiene determinando (o con appositi istrumenti o col calcolo) l'area del poligono mistilineo e dividendone il valore per il valore della base AS di esso.

Si può dire ancora che *la media è data dal valore di quella temperatura, al disopra e al disotto della quale hanno ugualmente oscillato le temperature considerate.*

Secondo la definizione stessa di media, l'area della parte situata al disopra della *retta LM* condotta parallelamente ad *ox* dal punto che da *ox* dista dell'altezza del rettangolo è uguale all'area della parte situata al disotto, poichè le due parti stesse risultano dalla sottrazione di aree uguali dall'area complessiva. Questa uguaglianza cesserebbe se si spostasse la retta parallelamente a sè stessa in un senso o nell'altro. Una curva data non ammette dunque che un'unica media, la quale è così perfettamente determinata.

Oltre all'uso del calcolo e di istrumenti appositi (planimetri) si può giungere alle medie per altre vie.

Sopra un cartoncino di spessore uniforme si disegna il poligono mistilineo e lungo la linea che lo limita si taglia esattamente il cartoncino, poi su uguale cartoncino si traccia e si taglia un rettangolo, con la base uguale al lato del poligono mistilineo opposto alla linea curva, e con un'altezza uguale all'unità di misura delle ordinate (rettangolo unitario). Si pesano i due cartoncini ritagliati e siccome hanno la stessa grossezza si può dire che il rapporto fra i loro pesi dà il rapporto fra le due aree del poligono e del rettangolo. Tale rapporto ci esprime evidentemente l'altezza del rettangolo corrispondente al poligono mistilineo, cioè la *media cercata.*

I valori ottenuti procedendo nei vari modi indicati non differiscono gli uni dagli altri che per quantità inferiori agli errori di osservazione.

Basta del resto il più delle volte prendere la media aritmetica delle otto osservazioni fatte di tre ore in tre ore per avere un numero identico alla media vera.

Quasi sempre però pei vari elementi meteorologici si prendono 3 valori di ciascuno di essi a tre ore distinte della giornata che sono di solito le 9 le 15 e le 21 e se ne fa la media aritmetica per avere la media diurna. Dalle temperature diurne si può passare a quelle mensili sommando i 30 valori alla media diurna corrispondente ai 30 giorni mensili e dividendo la somma per 30.

Da queste si può passare alle medie temperature annue sommando i 12 valori delle medie mensili e dividendo il totale per 12.

Per bene caratterizzare sotto il punto di vista meteorologico un luogo della superficie della Terra conviene indicare per esso i cosidetti *valori normali* degli elementi meteorologici i quali sono le medie dei valori di tali elementi (mensili od annue) ricavate da numerose misure riflettenti almeno un periodo di dieci anni. Si chiamano tali valori, *medie normali.*

§ 399. **Medie orarie.** — Considerando l'andamento della temperatura in vari giorni successivi, possiamo un giorno trovare il massimo di temperatura alle 11, in un altro alle 9 ecc.; ciò per modificazioni varie delle vicende atmosferiche nelle varie giornate. Eppure vi ha luogo a ritenere che se non vi fossero perturbazioni accidentali nelle

condizioni dell'atmosfera, per la regolarità del moto rotatorio della Terra riflettentesi in una regolare azione della radiazione solare sulla superficie del globo, la temperatura dell'aria dovrebbe subire l'andamento regolare diurno al quale abbiamo accennato.

Evidentemente conviene ripulire le determinazioni dalle influenze esercitate dalle perturbazioni accidentali.

Si suppone *a priori* che se ci si riferisce ad un numero grande di misure di un dato elemento sieno state tante le perturbazioni che avranno portato ad un eccesso della misura sul valore che si avrebbe senza perturbazioni, quante le perturbazioni che avranno portato ad un difetto. Per avere un valore prossimo a quello che si avrebbe senza perturbazioni si dovrà dunque fare la media aritmetica per un grande numero di misure.

Orbene, questo si fa per il caso della temperatura diurna calcolando le così dette *medie orarie* che si ottengono nel modo seguente.

Si estendono le osservazioni sull'andamento della temperatura per un mese almeno, si trovano i valori della temperatura di ogni giorno nelle varie ore e si fanno le medie di tutte le temperature misurate alle ore 1,2,...12,...17,...24. Facendo il calcolo per un periodo di tempo piuttosto lungo, si riesce ad eliminare sempre meglio le variazioni irregolari perturbatrici. Apparisce allora subito l'andamento deciso cui già si fece allusione.

§ 400. **Atmosfera - Sua costituzione e sua altezza.** — L'atmosfera è costituita da un miscuglio di gas che si trovano sempre in proporzioni quasi costanti, almeno nelle regioni prossime alla superficie del globo. Di questi gas, notevoli sono l'ossigeno, l'azoto e in più tenue misura l'anidride carbonica che per le sue proprietà fisiche e per altre sue speciali funzioni presenta speciale interesse.

Nell'aria troviamo ancora in discreta quantità ed in proporzione variabilissima il *vapor acqueo* che ha molto interesse nei fenomeni meteorologici Tanto interessante che di esso dovremo fare in seguito argomenti di speciale trattazione. E degno di rilievo è anche il pulviscolo così detto atmosferico.

Se l'aria da cui l'atmosfera è costituita avesse su tutta la sua altezza una densità costante, l'esperienza classica di Torricelli ci farebbe sapere immediatamente fino a che altezza si trova il gas che ci circonda.

Essendo a volumi uguali l'aria 10460 volte più leggera del mercurio, lo strato d'aria facente equilibrio ad una colonna di 76 cm. di mercurio sarebbe:

$$s = 76 \times 10460 \text{ cm.}$$
$$s = 7950 \text{ metri e in cifra tonda } 8000.$$

Ma la densità varia marcatamente coll'altezza e quindi il calcolo così eseguito non è attendibile.

Dalla durata del crepuscolo (fenomeno per cui l'atmosfera apparisce ancora indirettamente illuminata nonostante che il Sole sia tramontato) si può pure fare un calcolo che dia un indizio dell'altezza dell'atmosfera, e si è trovato un valore prossimo ad 80 chilometri.

Gli aereoliti o pietre meteoriche, raggiungendo la nostra atmosfera con enormi velocità per la *resistenza del mezzo* che in essa incontrano, si riscaldano e divengono incandescenti Misurando l'altezza massima di loro apparizione si può avere un indizio dell'altezza dell'atmosfera.

Orbene, l'osservazione delle stelle filanti spinse il limite fino a 200 chilometri. Notiamo d'altronde che i dati generali relativi ai movimenti della Terra ed all'attrazione newtoniana permettono di assegnare un limite alla presenza dell'aria. Difatti non possono aversi molecole materiali di aria al di là del punto dello spazio pel quale la forza centrifuga è uguale alla forza di gravità. Senza di ciò le molecole sfuggirebbero nello spazio per essere sostituite da altre, che sfuggirebbero a lor volta e così di seguito fino a completo esaurimento della riserva sugosa. Si può calcolare questo limite. Difatti noi sappiamo che la forza centrifuga all'equatore è uguale ad $\frac{1}{288}$ della gravità; la forza centrifuga d'altronde cresce come la distanza del centro della Terra, mentre la gravità varia in ragione inversa del quadrato di questa distanza.

Dunque, per avere la posizione del punto nel quale queste due forze sarebbero uguali, basterà estrarne la radice cubica di 289: si trova così il numero 6,6. È dunque il numero dei raggi terrestri, *contati a partire dal centro*, al di là dei quali non possono più esistere molecole materiali fluide collegate al moto della Terra. Se si conta a partire dalla superficie della Terra si trovano 5, 6 raggi.

Questo valore fornisce un limite teorico all'atmosfera nel senso che indicherebbe la distanza massima alla quale delle molecole gassose provviste di velocità propria

potrebbero venire trattenute nella zona di attrazione terrestre. Molecole rade siffatte sarebbero elementi di un *mezzo* ma non costituirebbe un *mezzo*. *Praticamente* si può ritenere che l'altezza sia di circa 200 chilometri, e inoltre, che, a partire dagli 80 o 100 chilometri al massimo, l'atmosfera modifichi profondamente e bruscamente colla sua costituzione (vi sarebbero esclusivamente idrogeno ed elio) i suoi caratteri fisici fra i quali, principale, la densità.

In base a ciò si è divisa l'atmosfera in *atmosfera effettiva* (da 0 ad 80 o 100 chilometri) ed in *altosfera* (da 80 o 100 a 200 chilometri).

L'atmosfera effettiva sarebbe costituita dalla *troposfera* da 0 a 10 o 12 chilometri) e dalla *stratosfera* (da 10 o 12 a 80 o 100 chilometri).

La troposfera a sua volta sarebbe costituita da uno strato da 0 a 3500 metri nel quale si produrrebbero tutte le perturbazioni atmosferiche (burrasche, cicloni, grandi fluttuazioni barometriche), e da uno strato compreso fra i 3500 e gli 11000 metri, limitato dalla regione nella quale si formerebbero e si muoverebbero certe nubi leggere dette *cirri*. All'infuori che in queste regioni limite, in tutto lo strato, l'atmosfera avrebbe soltanto moti verticali di convezione, sia ascendenti, sia discendenti.

§ 401. **Radiazione solare - Costante solare - Irradiazione.** — Grandissima importanza per la sua azione diretta ed indiretta sui fatti fisici dell'atmosfera ha la radiazione solare.

L'energia solare propagandosi per irraggiamento fino a noi deve attraversare l'atmosfera e subire un assorbimento per parte di questa così da giungere alla Terra con una intensità alquanto diminuita.

Tale energia, per una determinata porzione di superficie colpita, deve farsi sentire in misura tanto minore quanto più grande sia l'angolo formato dalla radiazione incidente colla normale alla superficie medesima (Fig. 546).

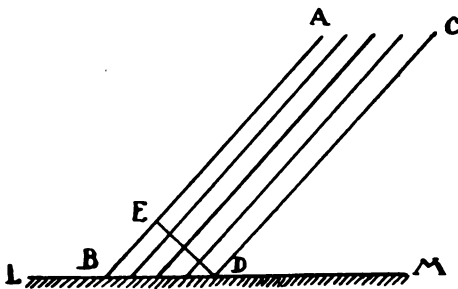



Fig. 546.

La quantità della radiazione solare ricevuta nel corso di una giornata da una determinata porzione della superficie del globo risente sensibilmente del valore della latitudine per il luogo che si considera.

Talchè, a questo riguardo, i punti della Terra si possono e si sogliono raggruppare in cinque zone distinte: la zona *equatoriale*, compresa fra i due tropici; le *due zone medie*, comprese tra i tropici ed i cerchi polari; infine le *due calotte*, che si estendono dai cerchi polari fino ai poli.

Notevole influenza esercitano sul valore della radiazione solare ricevuta dalla superficie del suolo, le stagioni.

E l'influenza delle stagioni si esplica in tre modi diversi: con le altezze differenti che il Sole raggiunge ogni giorno alla medesima ora sull'orizzonte; con la durata ineguale dei giorni; colla diversa distanza del Sole dalla Terra.

Attinometria - Legge del Bouguer - Costante solare. — Dalle misure di intensità della radiazione solare fatte con apparecchi, detti *piroeliometri* od *attinometri*, in punti ad altitudine differente nell'atmosfera, si è potuto vedere che sensibilmente la quantità di calore assorbito dall'atmosfera cresce in progressione geometrica, mentre la grossezza dello strato atmosferico cresce in progressione aritmetica (Legge del Bouguer) e quindi si è giunti a fissare il valore della *costante solare* (quantità di calore inviata dal Sole, nell'unità di tempo, su ogni centimetro quadrato di superficie normale ai raggi incidenti ai limiti dell'atmosfera) in 3 calorie.

Irradiazione. — Il calore che la radiazione solare reca alla superficie del globo in quantità varia, secondo le ore della giornata, il periodo dell'anno, la latitudine geografica, e le condizioni di trasparenza dell'atmosfera, viene dal materiale costituente la superficie terrestre assorbito in una misura diversa, dipendentemente dalla natura del materiale stesso. Ma viene anche irradiato in misura, variabile (come nel caso dell'assorbimento) con la natura del materiale terrestre superficiale. I terreni nudi e sabbiosi del deserto hanno forte potere assorbente ed emissivo: si riscaldano dunque rapidamente, e con altrettanta rapidità si raffreddano. La neve pure emette il calore in misura elevata, condizione che

favorisce il raffreddamento notturno per irradiazione. Invece le regioni coperte di vegetazione adoprano la maggior parte del calore solare a immagazzinare l'energia necessaria allo svolgimento delle funzioni vitali delle piante, che costituiscono la vegetazione superficiale, per modo che lo scamhio che in tali regioni si ha fra il suolo e gli strati sovrastanti dell'atmosfera sarà assai più lento.

Orbene, mentre il vapor acqueo, l'anidride carbonica ecc., che entrano, in piccola misura, nella composizione dell'aria, assorbono notevolmente alcune delle radiazioni calorifiche che compongono i raggi solari, l'aria è per queste radiazioni quasi trasparente o in altre parole manifesta un potere assorbente piccolissimo.

Ne viene da ciò, che, se anche esistesse un buon potere assorbente per l'aria prossima alla superficie del suolo, non rimarrebbe che una piccola parte della radiazione da assorbire, dopo l'assorbimento già effettuatosi per opera degli strati superiori.

Si può dunque esser certi che per effetto della radiazione solare diretta l'aria non può riscaldarsi sensibilmente.

Ma un assorbimento abbastanza forte l'aria lo opera per certe radiazioni, quali sono emesse anche dai corpi a temperature non elevate.

L'irradiazione è appunto costituita da tali radiazioni oscure, per cui la radiazione oscura del suolo risentirà un buon assorbimento per parte dell'aria, specialmente di quella che costituisce gli strati più bassi. Da ciò un riscaldamento dell'aria, che se trova la sua causa prima nella radiazione solare diretta, ha la causa immediata nella irradiazione.

La considerazione dell'irradiazione, aggiunta a quella dell'irragiamento solare, mostra come il clima di un luogo oltre che dalla latitudine geografica (*climi equatoriali* e *tropicali, climi temperati* più o meno caldi e *climi polari*) dipenda dalla natura superficiale del suolo, continente o mare; la terra e le rocce da una parte e l'acqua dall'altra, avendo calori specifici e poteri assorbenti ed emissivi differenti (*climi continentali* e variazioni marcate, *climi marittimi* più uniformi).

§ 402. **Misura delle temperature.** — L'elemento meteorologico più importante nel fissare le condizioni o il carattere di un luogo nei diversi punti della superficie del globo, è la temperatura. In meteorologia si valuta spesso la temperatura per mezzo di termometri a mercurio. In casi speciali nei quali si adoperino termometri ad alcool o termometri di altra natura, quali i termometri metallici, si sottintende senz'altro che la graduazione di questi istrumenti venne fatta per confronto con un termometro a mercurio. È dunque sempre alla scala centigrada di questo tipo di termometro che si riferiscono in meteorologia le temperature misurate.

Termometro a massima ed a minima. — Nella meteorologia è assai importante il conoscere le temperature massime e minime che si verificano durante il periodo di una giornata. Per ottenerle si ricorre ai termometri a massima e a minima dei quali già si parlò nel capitolo della termometria.

In questi ultimi tempi si è molto diffuso l'uso di istrumenti registratori. Sono molto adoperati i *termografi Richard.* Ne descriveremo uno.

Si tratta di un termometro a bulbo metallico ripieno di alcool, costituito da un bulbo a sezione ellittica molto appiattito e piegato ad arco. Quando la temperatura cresce, l'alcool si dilata e la curvatura del tubo diminuisce, e quando la temperatura diminuisce, l'alcool si contrae e il tubo per l'elasticità del metallo accresce la sua curvatura. Il tubo è fisso ad una estremità e gli spostamenti sono trasmessi, ingranditi per mezzo di leve, dall'estremità libera del tubo stesso ad un'asticciuola che porta una pennina scrivente sovra un foglio attorno ad un tamburo in rotazione.

La pennina si sposta dal basso all'alto ed inversamente a seconda che la temperatura cresce o diminuisce. Sul foglio sono tracciati due sistemi di linee: l'uno a linee orizzontali, le linee di temperatura, tracciate alla distanza di un grado di temperatura, e l'altro a linee verticali, le linee orarie, tracciate ad arco di circolo con raggio uguale a quello dell'asticciuola recante la pennina, succedentisi con una. distanza di solito corrispondente a quattro ore. La puntina traccia quindi il grafico della temperatura.

§ 403. **Temperatura dell'aria - Disposizione dei termometri.** — La determinazione della temperatura dell'aria presenta qualche difficoltà per diverse ragioni. Ammesso infatti che l'aria non venga rinnovata incessantemente attorno al termometro, la massa di questo è grande rispetto a quella del gas del quale deve notare la temperatura, epperò senza l'indicata rinnovazione dell'aria ne risulterebbe per le indicazioni termometriche un ritardo e, se la temperatura dell'aria variasse rapidamente, potrebbero queste variazioni venire quasi interamente smorzate dal termometro.

Di più, il vetro che circonda il mercurio del termometro è trasparente per le radia-

zioni luminose dotate o no di azione calorifica, non lo è per le radiazioni calorifiche oscure che si diffondono da corpi riscaldati. Se il termometro sarà quindi esposto a radiazioni dirette o indirette del Sole assorbirà il calore di queste radiazioni e non lo potrà poi lasciare sfuggire che per conducibilità, vale a dire lentamente: il termometro prenderà un eccesso di temperatura sull'aria ambiente.

Per raggiungere l'intento di misurare con esattezza la temperatura dell'aria bisogna sottrarre il termometro all'azione diretta dei raggi del Sole e dall'azione per riverbero di tali raggi, esponendolo nel lato nord degli edifici e proteggendolo entro una cassetta fatta con doppia persiana di legno o di metallo.

Di più, bisogna cercare che l'aria si rinnovi con qualche frequenza attorno al termometro, altrimenti potrebbe formarsi attorno all'istrumento una piccola atmosfera d'aria stagnante a temperatura diversa da quella dell'ambiente. Colla doppia persiana questa condizione è soddisfatta solo in modo approssimativo. Nel caso in cui si debbono fare misure più precise bisogna ricorrere ad artifici atti a produrre una corrente d'aria attorno al tubo termometrico.

Variazione diurna della temperatura. — La temperatura subisce delle variazioni nel corso della giornata che si manifestano dotate di una qualche regolarità talvolta anche nelle osservazioni di ogni giorno prese singolarmente. Tali variazioni appariscono però ben nette e regolari se si considerano le medie mensili delle temperature per le diverse ore della giornata. Con questo ultimo metodo si arriva difatti alle seguenti constatazioni.

La temperatura comincia ad innalzarsi quasi subito dopo il levar del Sole e mantiene moto ascendente sino ad un valore massimo che si nota verso le quattordici. Dopo, si ha un abbassamento che continua per il resto della giornata e per tutta la notte sino a qualche tempo dopo il levar del Sole nel giorno successivo.

È facile spiegare perchè l'ora del minimo segua il levar del Sole e l'ora del massimo sia spostata rispetto al mezzogiorno.

La temperatura che si era abbassata per tutta la notte, in conseguenza dell'irradiazione verso gli spazi celesti, continua a discendere sino al momento in cui il calore inviato dal Sole durante un certo tempo diventi superiore a quello che si perde per irradiazione.

Per ciò che si riferisce all'ora del massimo, spostata rispetto al mezzogiorno, epoca nella quale il Sole invia la maggior quantità di calore, il ragionamento non è meno semplice.

Difatti, la quantità di calore ricevuta dal suolo in un momento qualunque viene ad aggiungersi a quella che fu raccolta nei momenti antecedenti, di guisa che, se non vi fosse causa alcuna di dispersione la temperatura crescerebbe continuamente dal levar del Sole sino al tramonto. Ma, a misura che la temperatura si innalza, le perdite per irradiazione aumentano, e così si arriva ad un istante, compreso fra il mezzogiorno e l'ora del tramonto, nel quale il calore ricevuto durante un certo tempo e che va diminuendo, diventa uguale al calore perduto per irradiazione. Precisamente in quell'istante la temperatura cesserà di aumentare, e siccome il Sole va declinando, da quell'istante la perdita di calore dovrà superare l'acquisto e conseguentemente la temperatura dovrà diminuire.

Variazioni della temperatura coll'altezza. — Si sa da tutti come la temperatura dell'aria diminuisca gradatamente coll'altezza, per quanto a primo e irreflessivo giudizio si potesse pensare il contrario. Sembrerebbe difatti che in alto, con un'atmosfera più pura, con uno strato sovraincombente minore di quello che si ha al livello del mare e quindi meno assorbente, dovesse aversi una temperatura più elevata. Ma basta riflettere anche per poco a tutte quelle considerazioni che si fecero circa il valore dell'assorbimento esercitato dall'aria sulla radiazione solare diretta e circa l'elemento principale che definisce la temperatura dell'aria, per convincersi che deve appunto succedere il contrario, che deve cioè aversi una diminuzione graduale di temperatura coll'altezza.

A spiegare quantitativamente le variazioni secondo l'altezza bisogna anche tener conto del raffreddamento (adiabatico) prodotto dalla espansione alla quale va soggetta l'aria che si eleva in correnti ascendenti e del riscaldamento (adiabatico) prodotto dalla compressione dell'aria che scende in correnti discendenti.

Per bene esprimere come varia la temperatura lungo una verticale nella massa atmosferica, si indica la variazione del *rapporto fra la differenza delle temperature che si osservano nei punti di intersezione della verticale con le superfici basi di ciascuno dei vari strati successivi nei quali si suppone d'aria la massa atmosferica e la lunghezza del segmento di verticale chiuso entro lo strato stesso.*

Tale rapporto si è chiamato *gradiente termico* e si ritiene positivo quando, come

ordinariamente succede, la temperatura diminuisce coll'altezza, negativo in caso contrario

Le più recenti misure della temperatura dell'aria hanno portato a constatare che il gradiente diminuisce coll'altezza sino a 12 chilometri circa per poi divenire negativo ed assumere piccolo valore per uno strato detto *isotermico*, oltre il quale ritorna ad essere positivo e decrescente.

Variazione della temperatura coll'altezza alla superficie del suolo. — Se si considerano direttamente i valori della temperatura a diverse altezze in stazioni situate alla superficie terrestre, si rinviene un complicato processo di variazione, che lascia però campo ad una semplice manifestazione del processo medesimo se si considerano le medie mensili od annue. Le anomalie che rendono complicato il processo di variazione si spiegano poi agevolmente qualora si considerino le cause multiple che modificano le oscillazioni diurna ed annua della temperatura.

L'osservazione mostra che per stazioni situate si a diversa altitudine, ma in condizioni topografiche simili, la temperatura decresce coll'altezza in ragione di circa 0°,5 per ogni 100 metri.

§ 404. **Isoterme.** — Qualora si voglia rappresentare la distribuzione della temperatura alla superficie del globo, occorre notare su di una carta geografica i valori osservati per la temperatura delle diverse località e riunire poi con un tratto continuo i punti di temperatura uguale. S'intende che prima di riportare i valori della temperatura sulla carta, deve osservarsi la riduzione al livello del mare. Le linee che si ottengono nel modo indicato ricevono il nome di *isoterme*. Esse possono essere sincrone o simultanee se si riferiscono a valori osservati per tutti i luoghi nel medesimo momento. Possono anche essere formate colle temperature medie di un giorno, di un mese, di una stagione, di un anno in particolare, oppure colle temperature normali dell'anno o di determinate stagioni o mesi. In questo ultimo caso si dicono normali.

Equatore termico. — Se si determina su ciascun meridiano il punto, nel quale la temperatura media annua ha il maggior valore e si riuniscono poi i vari punti così ottenuti, si riesce a tracciare una linea, la quale non è una isoterma ed alla quale si dà il nome di *equatore termico.*

Per esso si passa dalla temperatura di 6 gradi nell'Oceano Pacifico a più di 30° in Africa. Sui grandi mari esso si avvicina molto all'equatore geografico. Sui continenti si allontana molto al nord tanto da raggiungere la latitudine di 20° sul Messico e sull'India e una latitudine un po' superiore sul Sahara.

La posizione dell'equatore termico è in stretta relazione colle varie condizioni e manifestazioni meteorologiche e specialmente colla circolazione generale dell'atmosfera.

Tracciando l'equatore termico, oltre che sulla carta delle isoterme annuale, anche in quella delle isoterme di gennaio e di luglio si vedrebbe come esso segua i movimenti del Sole. Discende più a sud in gennaio e risale più a nord in luglio. Ma il movimento verso nord in luglio è più pronunciato dell'altro verso sud in gennaio.

§ 405. **La pressione atmosferica** che si valuta coi barometri è elemento meteorologico impotantissimo perchè è dalle sue variazioni e dalla sua distribuzione che dipendono le vicende del tempo.

Variazioni della pressione coll'altezza. — Se ci riferiamo ad una massa liquida omogenea e consideriamo la pressione esercitata su porzioni superficiali immaginate disposte orizzontalmente a diverse profondità, si trova che la pressione cresce proporzionalmente alla distanza fra la superficie libera e il luogo ove la pressione viene considerata. Per l'acqua la pressione sopra ogni centimetro quadrato cresce in ragione di 100 gr. al metro.

Riferendoci invece ad una massa aeriforme, estesa alla massa atmosferica, per esempio, tale proporzionalità più non si riscontra. La pressione è sempre uguale al peso del fluido sovrastante, e siccome la densità dell'aria è proporzionale alla pressione, gli strati inferiori saranno più densi dei superiori. Come conseguenza si avrà una rapida diminuzione della pressione coll'altezza della superficie del globo.

Laplace ha notato che nell'aria in riposo la pressione diminuisce secondo una progressione geometrica quando l'altezza cresce in proporzione aritmetica.

La pressione barometrica sulla superficie del globo - Isobare — Al fine di studiare la distribuzione della pressione atmosferica sulla superficie del globo, mezzo opportunissimo si presenta quello della costruzione per un planisfero di linee congiungenti i punti di uguale pressione, di linee come si dice *isobare.*

Naturalmente i valori, dei quali si deve trarre profitto per la formazione delle carte isobariche, saranno liberati dall'influenza dell'altitudine e dall'influenza della gravità, che rende il mercurio del barometro variamente pesante alle varie latitudini. Si riducono perciò i valori misurati al livello del mare ed alla latitudine di 45°.

Di più va notato che anche con le isobare si possono costruire carte simultanee o medie.

Le isobare che raccolgono le medie normali annue ci mostrano dapprima che nella regione equatoriale si ha una zona, lungo la quale la pressione è assai bassa (inf. a 760 mm.). Da una parte e dall'altra, un poco al di là dei tropici, si hanno zone di pressione elevate, nelle quali si disegnano dei massimi ben marcati, soprattutto negli oceani. Questi centri principali sono cinque: l'uno nel Pacifico nord, l'altro presso le Azzorre sull'Atlantico nord, e, nell'Emisfero sud, uno sul Pacifico, un secondo sull'Atlantico, un terzo sull'Oceano Indiano.

Al di là delle zone di alta pressione, si nota una diminuzione di pressione allorchè si procede verso i poli. Il fenomeno è ben evidente nell'Emisfero sud, ove la pressione annua media cade ovunque al disotto di 750 mm. al di là della latitudine 52°. Nell'Emisfero nord si fa sentire accentuatamente l'influenza dei continenti, tuttavia il fenomeno non è meno manifesto; le basse pressioni si mostrano in modo nettissimo sui mari. Si hanno due minimi (inf. a 754 mm.) uno ad est della Groenlandia e l'altro al nord del Pacifico, presso lo stretto di Behring.

Isobare di gennaio e di luglio. — Le isobare annue non sono sufficienti per mettere in rilievo tanti fatti che si ricollegano allo studio della distribuzione della pressione alla superficie del globo.

Non potendo fermarci a considerare le isobare normali per tutti i mesi dell'anno, ci limiteremo ad una rapida osservazione di quelle corrispondenti ai mesi di *gennaio* e di *luglio*.

Nelle isobare di gennaio e di luglio noi ritroviamo (come sulla carta annuale) il minimo equatoriale e i due massimi al di là dei tropici; ma la loro posizione ha un poco cambiato. Il minimo equatoriale discende al sud dell'equatore in gennaio, rimonta al nord in luglio. Esso presenta dunque nel corso dell'anno una oscillazione da una parte all'altra dell'equatore nel senso del moto del Sole in declinazione. Avviene la stessa cosa delle due zone di massimo di pressione.

Questo spostamento delle zone di minimo e di massimo di pressione è correlativo a quello del massimo di temperatura: la zona di pressione minima segue gli spostamenti della zona di temperatura massima o equatore termico.

Il vento. — Se due regioni attigue dell'atmosfera hanno pressione differente, pel fatto che la pressione atmosferica fa equilibrio in senso verticale alla forza espansiva propria dell'aria, si avrà manifestamente una tendenza ad un moto dell'aria dalla regione ove la pressione è maggiore a quella ove la pressione è minore, fino al momento in cui fra le due regioni non si sia stabilito l'equilibrio barico.

Vale in generale la legge, che l'*aria sulla superficie della Terra tende a muoversi dalle regioni ove la pressione barometrica è alta verso le regioni ove la pressione barometrica è bassa.*

Fra due punti opposti di due isobare si avrà quindi la tendenza al moto dell'aria dal punto appartenente all'isobara corrispondente alla maggiore pressione verso l'altra.

Si chiama *gradiente barico* fra i due punti il rapporto fra la differenza di pressione esistente nei due punti e la loro distanza. L'unità pratica di misura del gradiente è quella corrispondente al gradiente che esiste fra due punti che distino di un grado terrestre (111 chil., 111) ed abbiano la differenza di pressione di un millimetro. Il valore del gradiente fra due luoghi che distino di d chilometri e fra i quali si abbia una differenza barometrica h in mm. di mercurio, sarà quindi dato da:

$$x = \frac{111\,h}{d}. \qquad (115)$$

Si chiama *vento* ogni movimento d'aria. Gli elementi caratteristici principali suoi sono la *direzione* e la *velocità* oppure la *direzione* e la *intensità*.

La direzione del vento che interessa spesso considerare alla superficie del globo ha andamento pressochè orizzontale, quantunque non manchino correnti a direzione verticale o pressochè verticale.

Se non sia fatta al riguardo esplicita indicazione contraria si riterrà che il vento abbia andamento orizzontale e se ne indicherà la direzione coll'indicare il punto cardi-

nale donde il vento viene. Spesso si debbono considerare punti intermedi a quelli separati dai 4 punti cardinali.

Pei venti provenienti dai quattro punti intermedi (simmetrici rispetto ai punti cardinali) si usano talora denominazioni speciali; denominazioni speciali si adoperano frequentemente anche per i venti provenienti dai punti cardinali.

Così per i venti di	si adoperano spesso le denominazioni
N	Tramontana
N-E	Greco
E	Levante
S-E	Scirocco
S	Mezzogiorno
S-W	Libeccio
W	Ponente
N-W	Maestro.

Per determinare la direzione del vento negli strati bassi dell'atmosfera si ricorre all'*anemoscopio* ossia alla *banderuola*, che consiste in generale di una lamina metallica piegata a *V* e girevole attorno ad un asse verticale interno all'angolo e parallelo allo spigolo.

Interessa sapere che il movimento rotatorio della Terra fa sì che la direzione di un vento, quale viene da noi giudicata, non coincide mai colla direzione del gradiente, ma è deviata rispetto alla direzione del gradiente. Nel nostro emisfero la deviazione è verso destra, mentre che nell'altro è verso sinistra; cosicchè un vento, il cui gradiente sia diretto come rappresentano le frecce punteggiate, ha direzioni nei due emisferi come mostrano le frecce a tratto continuo. Per questa circostanza *una persona che riceva un vento alle spalle ha, nel nostro emisfero, la bassa pressione alla sinistra ed un po' in avanti e la massima alla propria destra ed un po' indietro. Nell'altro emisfero la bassa pressione sarà a destra ma un po' in avanti e l'alta a sinistra un po' indietro.* Ciò costituisce la interessante *legge di Buy-Ballot.*

Emisfero boreale — Emisfero australe

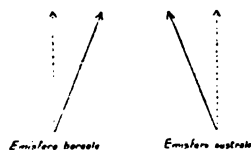
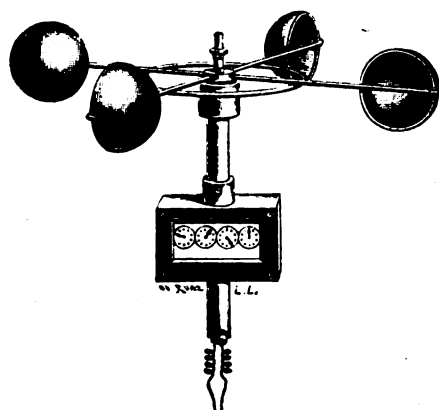



Fig. 547.

Velocità ed intensità del vento. — Si chiama velocità del vento lo spazio percorso dall'aria nell'unità di tempo. Si chiama *forza* od *intensità* del vento la pressione che il vento esercita contro un ostacolo determinato.

Si chiamano *anemometri* gli apparecchi che servono alle misure dei due elementi indicati; *anemometri di velocità* quelli corrispondenti al primo; *anemometri di pressione* quelli corrispondenti al secondo. I primi indicano la velocità del vento in metri al secondo o in chilometri all'ora; gli altri indicano in chilogrammi per metro quadrato la pressione che il vento esercita contro un ostacolo, sul quale venga a cadere normalmente.

Fig. 548.

I vari anemometri a pressione fra i quali il tubo di Pitot (tubo piegato ad U, provveduto ad un estremo di un padiglione che viene sempre tenuto rivolto verso il vento da una banderuola, e col quale si valuta la pressione del vento dalla differenza di livello del mercurio in esso contenuto) non poterono trovare uso regolare negli osservatorî, tuttavia essi permisero di stabilire che la *pressione del vento è proporzionale al quadrato della sua velocità*. Ed in proposito è bene tenere presente che ad un vento che abbia la velocità di un metro al secondo corrisponde una forza di 0,125 chil. per metro quadrato.

Gli anemometri di più facile osservazione e quindi i più usati, sono quelli di *velocità*. Il più comune è costituito da un molinello di Robinson, cioè da quattro bracci uguali

e perpendicolari fra loro, che ruotano attorno ad un asse verticale in un piano orizzontale e sono ciascuno provveduti all'estremità libere di una coppa emisferica.

Le aperture delle coppe sono rivolte circolarmente nello stesso senso ed il loro piano meridiano è disposto verticalmente; cosicchè da qualunque parte soffi il vento, le coppe ruotano sempre nel medesimo senso.

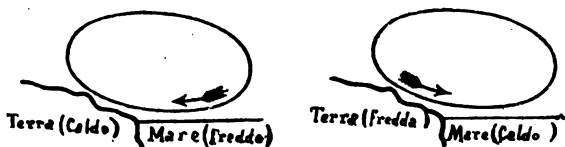
L'asse verticale del molinello è collegato ad un opportuno contatore, che permette di valutare il numero di giri compiuti dal molinello nella unità di tempo.

Siccome ad ogni rotazione del molinello ciascuna coppa percorre col suo centro un determinato cammino, dal numero di giri si potrà avere la velocità di rotazione del molinello.

La pressione del vento, essendo più grande sul lato concavo delle coppe che non sul lato convesso, la rotazione del sistema per effetto del vento avverrà per modo che il lato convesso delle coppe stia davanti, e con una velocità inferiore a quella del vento che determina il moto. Se per un determinato molinello si ha ad esempio che la velocità sua è 3 volte minore di quella del vento; si avrà, almeno in modo approssimativo, la velocità del vento moltiplicando per 3 quella del molinello.

La velocità di un vento sensibile moderato è da 1 a 2 metri al secondo, quella di un vento ben utilizzabile per il movimento di navi a vela è da 5 a 10 metri. Le velocità da 20 a 30 metri son quelle di venti violenti che recano tempesta. Si abbattono edifici da un vento che raggiunga o sorpassi i 40 metri.

Fig. 549.

Esistono venti che soffiano sempre nella stessa direzione, almeno nella stessa epoca dell'anno, e che si chiamano venti *regolari*. Gli altri che non hanno la indicata caratteristica si dicon *irregolari*.

Fra i venti regolari si distinguono i venti periodici, che soffiano alternativamente in un senso e nel senso opposto, ed i venti costanti, che soffiano sempre nello stesso senso.

È vento periodico la brezza (Fig. 549) che spira dal mare verso terra (brezza di mare) durante il giorno e dalla terra verso il mare (brezza di terra) durante la notte. Questo vento soprattutto sensibile nella zona torrida e sensibile da noi solo durante l'estate, si deve a ciò che durante il giorno, sotto l'azione dei raggi solari, il suolo si riscalda più dell'acqua del mare, e durante la notte la terra si raffredda più rapidamente dell'acqua.

Venti costanti sono gli *alisei* e i *contro-alisei*, spiranti i primi nelle regioni inferiori dell'atmosfera e gli altri nelle regioni superiori, secondo le direzioni che rappresentano le figure 550 e 551. Si spiega facilmente la loro formazione. Le regioni equatoriali essendo le regioni più calde della superficie del globo determinano, per riscaldamento, un'ascesa di aria e conseguentemente un richiamo d'aria dalle regioni prossime (alisei). L'aria elevandosi nella regione equatoriale si raffredda a misura che si eleva e si diffonde in alto dirigendosi al nord ed al sud (contro alisei). I due movimenti verso l'equatore nelle regioni basse dell'atmosfera, e dall'equatore ai poli nelle regioni elevate non si

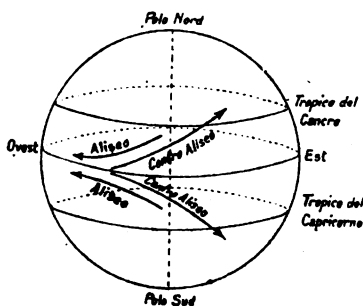
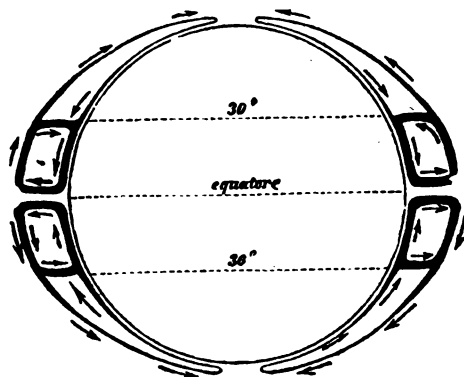



Fig. 550. *Fig. 551.*

producono come vorrebbe l'indicata causa loro, nella direzione dei meridiani, ma per la rotazione della Terra avvengono nelle direzioni rappresentate dalla Fig. 550.

Causa frequente di differenza di pressione fra due regioni prossime della superficie terrestre è una differenza di temperatura conseguente ad un riscaldamento locale sul globo o ad un raffreddamento.

Per il caso di un riscaldamento si ha una distribuzione di isobare a linee chiuse col centro a pressione più bassa e con isobare a pressioni crescenti col procedere dal centro alla periferia. Questa particolare distribuzione isobarica riceve il nome di *ciclone*. L'aria vi si muove secondo curve sinistrorse nel nostro emisfero e destrorse nell'altro che procedono dalla periferia verso il centro. Nel centro poi si ha una colonna d'aria ascendente, e l'insieme della distribuzione si sposta.

Fig. 552. - Una distribuzione isobarica accidentale che prelude a tempo cattivo.

Quando il gradiente vi è forte le masse d'aria sono animate da un rapido movimento vorticoso verso un asse verticale lungo il quale poi si elevano con grande velocità.

Tali venti sono talvolta disastrosissimi; tanto che le più violente tempeste europee non sanno darne un'idea. Possono essere animati da un movimento traslatorio con velocità variabile dai 10 ai 25 chilometri all'ora. Non sempre hanno questi caratteri violenti

Fig. 553. - Movimenti vorticosi sull'Oceano.

e quando li hanno col loro spostarsi alla superficie del globo raggiungono una grande estensione così da interessare larga parte della superficie terrestre. I cicloni delle nostre regioni hanno di solito grande estensione perchè ci provengono dopo lungo tragitto dalle regioni tropicali.

Fig. 554.

Si chiamano *anticicloni* distribuzioni isobariche con isobare chiuse ma corrispondenti a valore decrescenti della pressione dal centro alla periferia. L'aria ha in esso moto centrifugo. La stabilità loro è di gran lunga inferiore a quella dei cicloni, epperò si spostano meno rapidamente di questi.

§ 406. **Umidità dell'aria.** — Avemmo occasione di dire che se si abbandona dell'acqua in contatto dell'aria in un recipiente aperto, in breve tempo quest'acqua evapora. Se si pensa che l'atmosfera è in contatto per una grandissima superficie colle enormi masse d'acqua che ricoprono gran parte del nostro globo, è facile convincerci che l'aria atmosferica deve contenere del vapore acqueo.

Si dimostra facilmente la esistenza di questo vapore acqueo, ponendo in un vaso di vetro sottile (o meglio di metallo levigato contenente un poco d'acqua) dei pezzi di ghiaccio. Dopo poco la superficie esterna del vaso apparisce rivestita da uno straterello formato con goccioline d'acqua; è avvenuta sulla parete fredda del recipiente la condensazione del vapore acqueo, diffuso nell'aria prossima al recipiente.

Oltre alle grandi masse di acqua che si trovano alla superficie della Terra, producono continuamente del vapor acqueo nell'atmosfera, il suolo, che è sempre più o meno umido, i vegetali e gli animali. L'evaporazione si misura per mezzo di apparecchi conosciuti sotto il nome di *evaporimetri*.

Il vapore diffuso nell'atmosfera rende questa umida, come si dice volgarmente.

Interessa per varie ragioni la valutazione della umidità dell'atmosfera, umidità che suol considerarsi, per così dire, sotto due punti di vista.

Si può richiedere il peso del vapore acqueo contenuto in un metro cubo di aria e allora si richiede la così detta *umidità assoluta*. Sembrerebbe questa la maniera più semplice per valutare l'umidità dell'aria, ma essa è tuttavia la meno usata in meteorologia, perchè non vi sono procedimenti atti ad adoperare con rapidità tale misura Così non è procedimento molto rapido e molto preciso quello effet-

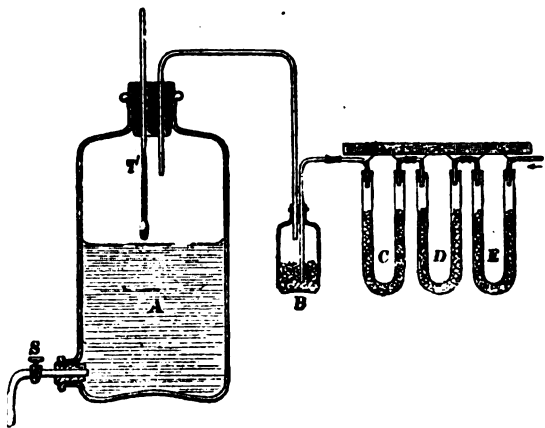



Fig. 555. - La massa d'acqua che effluisce da *B* aspira nel sistema di tubi contenente materiale essiccante *CDE* un volume d'aria pari al volume d'acqua uscita. Pesando prima e dopo del passaggio dell'aria i tubi, si ha dalla differenza di peso il peso d'acqua contenuta nel volume d'aria aspirata. Donde l'umidità assoluta.

tuato coll'apparecchio della Fig. 555. Essa ordinariamente si valuta misurando la pressione f, computata in mm. di mercurio, che esercita il vapore. Del resto, volendo, da questo valore f si può passare al peso in grammi del vapore contenuto nel metro cubo d'aria, mediante la relazione semplice:

$$p = 1,0559 \frac{f}{1 + 0,00367\, t}, \qquad (116)$$

ove t è la temperatura dell'aria al momento dell'esperienza.

Una medesima quantità di vapore acqueo contenuta in un certo volume d'aria può, a seconda della temperatura di questa, essere più o meno prossima a liquefarsi. E per il lato pratico della vita o delle applicazioni all'agricoltura, più che la quantità di vapore acqueo contenuta nell'unità di volume dell'aria, interessa la così detta *umidità relativa*, che è in relazione con la lontananza più o meno grande del vapore dalle condizioni di liquefazione. Essa è definita dal rapporto fra la quantità di vapore che effettivamente si trova nell'unità di volume dell'aria e quello che dovrebbe trovarvisi perchè, nelle condizioni esistenti di temperatura, il vapore fosse saturo e pronto quindi alla liquefazione.

Meglio, per quanto i due rapporti sieno uguali, si dirà che la *umidità relativa* o lo *stato igrometrico* è il rapporto fra la tensione attuale del vapore e la tensione che avrebbe se, nelle identiche condizioni d'ambiente, fosse saturo. È in sostanza il rapporto fra la umidità attuale e la umidità massima possibile a quella temperatura. Per convenzione tale rapporto, che non può superare l'unità, si moltiplica per 100.

Più piccola è la umidità relativa, più secca è l'aria e suscettibile di ricevere altro vapore e di facilitare l'evaporazione dei corpi.

Si chiama *igrometria* l'insieme dei processi che si adoperano per valutare la quantità variabile di vapor acqueo contenuto nell'aria ed *igrometri* in genere gli strumenti che servono a tale valutazione.

In commercio si trovano degli igroscopi empirici, che possono dare un'idea grossolana delle modificazioni dello stato igrometrico dell'aria.

Fig. 556.

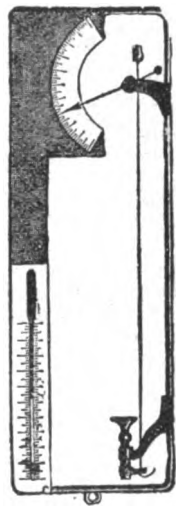
Meno grossolano degli altri è l'igrometro a capello (Fig. 556), basato sul fatto che i capelli, come diverse altre sostanze, quali le corde, il legno ed altre, variano di lunghezza col variare dell'umidità nell'ambiente ove si trovano. Questo strumento, dovuto a De Saussure, comprende un capello fissato per un estremo, passante sopra una puleggia e mantenuto teso da un piccolo contrappeso fissato all'altro estremo. La puleggia porta un indice che si sposta su di un quadrante graduato. Lo zero corrisponde alla secchezza completa e si ottiene ponendo lo strumento sotto una campana, vicino ad un vaso contenente acido solforico concentrato, avidissimo, come si sa, d'acqua. Il punto 100 si ottiene ponendo lo strumento sotto ad una campana le cui pareti siano bagnate con acqua. Le divisioni intermedie non fanno conoscere lo stato igrometrico definito più sopra, ma danno un'idea, come già si disse, delle variazioni dell'umidità dell'aria.

L'igroscopio Cappuccino, che si vede ancora frequentemente, utilizza una corda organica, che quando si allunga porta via il cappuccio mobile di sul capo al frate, e quando si accorcia, per l'aumentata umidità, rimette il cappuccio a posto. Giocattolo grazioso, ma non strumento scientifico, sarebbe anche destinato nell'intenzione dei costruttori e di quelli che ne hanno fiducia ad una previsione del tempo. È inutile dire che anche in questo senso è privo assolutamente di attendibilità.

Per misure scientifiche si ricorre di solito agli *igrometri a condensazione* basati su questo principio:

Un vapore non saturo diventa saturo mediante un abbassamento sufficiente della sua temperatura, conservando la sua tensione primitiva. Questi istrumenti funzionano nella maniera seguente:

Si raffredda una parte lucida (mediante evaporazione di un liquido volatile contenuto all'interno) In conseguenza di ciò si ha deposito di rugiada sulla superficie di questa parte, l'umidità dell'aria a contatto di questa parete fredda essendo diventata satura per l'abbassamento della temperatura a t. Si determina con cura questa temperatura t al momento del deposito di vapore condensato: è ciò che si chiama il *punto di rugiada*.

La tensione massima trovata nelle tavole del vapor acqueo a questa temperatura t dà il valore cercato f, poichè la forza elastica del vapore non ha variato malgrado il raffreddamento.

Con la formola suindicata si può trovare, se si vuole, p. Volendo lo stato igrometrico si cerca la tensione massima F corrispondente alla temperatura dell'esperienza e si fa il rapporto $\frac{f}{F}$.

Il migliore *igrometro* a condensazione è quello di *Regnault.* In esso il deposito di rugiada si produce su di un ditale di ottone dorato A, e raffreddato con evaporazione forzata di etere all'interno, i di cui vapori sono condotti lontano dal tubo D. Si osserva ugualmente di lontano la variazione del termometro T e la percezione del punto di rugiada è facilitata dal confronto con un secondo ditale B identico e vicino che, non essendo raffreddato, resta lucido.

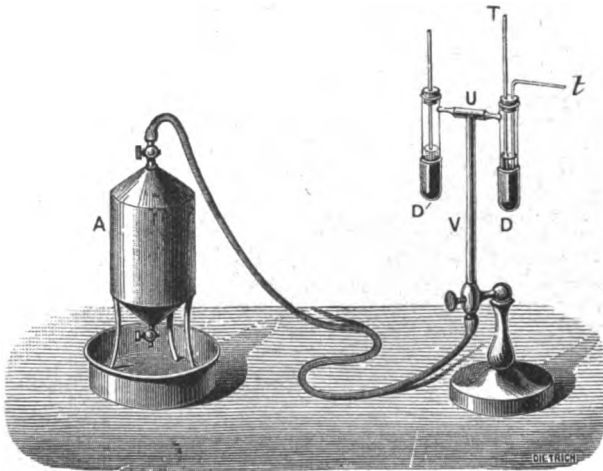



Fig. 557.

Altro igrometro degno di nota è il *peliometro* di August. Esso dà ad ogni momento la differenza di temperatura esistente tra un termometro a palla bagnata A (raffreddata mediante evaporazione dell'acqua condotta con lo stoppino m del serbatoio R) e un termometro vicino B, alla temperatura ambiente.

Si è visto (21) che la velocità dell'evaporazione è data dalla formola:

$$K(F - f).$$

D'altra parte questa velocità cresce col calore ceduto dall'aria ambiente al termometro bagnato, e tale cessione è secondo la legge di Newton proporzionale alla differenza di temperatura $t - t'$ dei due termometri.

Si avrà:

$$K(F - f).$$

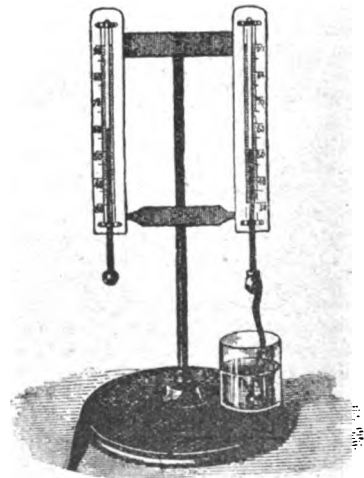
Una tavola aggiunta permette di trovare rapidamente f, in funzione di $(t - t')$ e di t'.

Fig. 558.

§ 407. **Nebbia e nubi.** — Quando l'aria si raffredda, il vapore in essa contenuto può condensarsi in minute goccioline che le tolgono la trasparenza, e formano ciò che si chiama la *nebbia*. Se la condensazione avviene in alto, a distanza dalla superficie del globo, la nebbia prende più specialmente il nome di *nube*.

La condensazione ha luogo sulle particelle di pulviscolo atmosferico e anche su piccole porzioni di aria cariche di elettricità e dette *ioni*.

Le goccioline di acqua che formano la nebbia o le nubi sono gocce piene e non vescicole contenenti una bolla d'aria come un tempo si ritenne e come qualcuno dice ancora. È stato possibile esaminarle bene col microscopio. Ed è stato anche possibile valutarne le dimensioni, che, in media, per ciò che concerne il diametro loro, può ritenersi di $^1/_{50}$ di millimetro.

Grazie a questa piccolezza le gocce cadono con grande lentezza, poichè la loro

superficie è grande in rapporto al loro volume e la resistenza dell'aria ne ritarda considerevolmente la caduta. Questo ritardo è favorito da inevitabili — sebbene leggerissimi — moti ascendenti (verticali o no) dell'aria, le nubi rimangono sospese, come piume leggerissime, facili al trasporto.

In alcune circostanze sembra che l'aria possa contenere una quantità di vapor acqueo maggiore di quella che normalmente corrisponde alla situazione. E si dice allora che l'aria è *soprasatura*.

In realtà, le cose procedono in questo modo: raggiunto lo stato di saturazione si ha, con ulteriore raffreddamento, una condensazione, ma tale condensazione avviene con formazione di goccioline così minute, da sfuggire all'ossevazione. Ora, lord Kelvin ha dimostrato col calcolo che la tensione massima del vapore in equilibrio con una goccia sferica è maggiore della tensione massima a contatto col liquido a superficie piana e tanto maggiore quando più grande è la curvatura della superficie della goccia. La formazione dunque della prima gocciolina tenuissima dà al vapore rimanente una tensione massima superiore a quella che gli era prima consentita e può quindi arrestarsi il processo di condensazione.

Condizione necessaria, affinchè la soprasaturazione suddetta si verifichi, si è l'assenza di pulviscolo atmosferico, che fornisce i primi e più comuni centri di condensazione del vapore acqueo.

Il raffreddamento che conduce alla condensazione del vapor acqueo si suol produrre nella libera atmosfera in maniere differenti:

1. Direttamente, sia per irridazione, sia per il passaggio dell'aria da una regione calda ad una regione fredda.
2. Per espansione.
3. Per mescolanza con una massa d'aria più fredda.

Due parole sul secondo processo, per ribadire alcune nozioni già date.

È noto, e lo si vuol provare col cosidetto acciarino pneumatico, che l'aria si riscalda quando la si comprime bruscamente. Inversamente, un rapido aumento di volume, (una dilatazione) è, per l'aria, causa di raffreddamento. Se, per esempio, si diminuisce bruscamente della metà la pressione di una massa d'aria primitivamente alla temperatura di $+ 20°$, questa discende fino a $— 34°$ (in tutto $54°$). Un tale fenomeno si produce frequentemente nell'atmosfera, perchè (per varie cause) masse d'aria sono spesso rapidamente spinte verso l'alto e risentono quindi variazioni sensibili di pressione. Si dilatano, e se non ricevono affatto calore dall'esterno, se subiscono cioè, come si dice, una dilatazione adiabatica, si raffreddano. La diminuzione di temperatura è proporzionale all'innalzamento in altezza.

Noteremo per ultimo come certe nubi sieno costituite da piccoli cristallini di ghiaccio.

Finalmente diremo come le nubi, che in una atmosfera calma sembrano persistere immutate nella loro massa, sono sede di un moto interno continuo, per cui le piccole goccioline cadono, pur lentamente, in una regione bassa meno umida e più calda, ove evaporano. Ma le goccioline cadute ed evaporate sono sostituite da altre nuovamente formate per nuova condensazione di vapore. E così incessantemente, finchè la nube persiste.

Elementi di una nube. — In ogni nube vanno considerati alcuni elementi caratteristici che, per semplicità, possono ridursi ai quattro seguenti:

1. La *forma*.
2. La *direzione* del luogo la quale si muove.
3. La *velocità* del movimento.
4. L'*altezza*.

È chiaro quindi che tutto il processo di osservazione e di studio delle nubi si riduce all'esame di questi singoli elementi distintivi.

Quanto alla forma ci si riferisce ad una classificazione della quale diremo fra breve.

Quanto alla direzione ed alla velocità, esse si determinano con operazioni convenienti, coll'uso ad esempio, dei nefoscopi che non possiamo qui considerare.

Quanto all'altezza, essa si determina con discreta esattezza mediante una operazione di triangolazione, simile a quella che si usa per stabilire l'altezza di un punto inaccessibile.

Classificazioni delle nubi. — Un fatto bene constatato è questo: certe forme principali di nubi si presentano nello stesso modo in tutti i paesi e d'altro canto la osservazione ripetuta ha messo ben in rilievo una stretta relazione fra queste varie forme e le condizioni generali dell'atmosfera. Si hanno quindi gli elementi e nel con-

tempo si palesa chiara la opportunità di una classificazione delle nubi con una denominazione atta di per sè ad indicare esplicitamente ed in maniera intelligibile a tutti i vari tipi. Sembra che la prima classificazione delle nubi sia stata data nel 1801 da Lamark. Ad ogni modo è certo che qualche anno più tardi Luca Horward propose una classificazione per lungo tempo adottata da tutti, e di recente assunta come base della moderna classificazione proposta dall'Abercromby e dal Hildebrandsson e fissata dal Congresso meteorologico internazionale tenutosi a Parigi nel 1899.

I tipi fondamentali proposti dal Horward erano il *cirro*, il *cumulo* e lo *strato*.

La moderna classificazione ha aggiunto a questi tre tipi un quarto, il *nembo*, ed ha considerato forme intermedie o derivate, per modo da raggruppare tutte le forme delle nubi nelle seguenti dieci categorie:

1. *Cirri*. Nuvole di un bianco uniforme e senza ombra, filamentose oppure a struttura nettamente fibrosa. I filamenti sono talvolta isolati, talvolta raggruppati in banchi più o meno compatti o in lunghe strisce. Quando ne esistono parecchie di queste strisce, disposte parallelamente, esse sembrano per un effetto di prospettiva convergere verso uno stesso punto o verso due punti opposti dell'orizzonte; questi punti indicano allora l'orientazione precisa delle strisce. Talora le fibre dei cirri si raggruppano in guisa d'assumere l'apparenza di piume, di pennelli, di pennacchi, di foglie, e sono spesso foriere di uragani. Corrispondono alle forme da noi dette volgarmente « code di gatto ».

2. *Cirro-strati*. Velo sottile, biancastro che dà al cielo un aspetto lattiginoso: a volte è affatto diffuso, a volte ha struttura fibrosa.

I cirri ed i cirro-strati non sono formati come le altre nubi da goccioline d'acqua in sospensione, bensì da piccoli aghetti di ghiaccio. Ad essi sono dovuti (per rifrazione della luce solare o lunare) gli *aloni*, ossia quei grandi circoli che si osservano talvolta intorno alla Luna e più di rado intorno al Sole.

Le nubi, costituite da goccioline liquide, non possono dare per rifrazione della luce attraverso ad esse, che delle semplici corone colorate, che spesso circondano molto da vicino la Luna, raramente il Sole.

3. *Cirro-cumuli*. Pallottole o fiocchi bianchi e senza ombre, disposti in gruppi o in file. Corrispondono alla denominazione volgare di *cielo a pecorelle*. I francesi usano per essi la denominazione equivalente alla nostra di *ciel moutonné*.

4. *Alto-cumuli*. Si distinguono dal tipo precedente, perchè costituiti da fiocchi più grossi, più serrati fra loro e dotati di ombre. Quando sono compatti danno al cielo l'aspetto che in alcune regioni italiane si designa con la denominazione a *pagnotte*, che i francesi dicono *pommelé*.

5. *Alto-strati*. Velo fitto, grigio od azzurrognolo, attraverso il quale il Sole e la Luna rivelano la loro direzione per un aumento di luce, senza tuttavia rendersi visibile, nè presentare fenomeni di colorazione. Mancano della struttura fibrosa che caratterizza i cirro-strati.

6. *Strato-cumuli*. Grossi ammassi di nubi di colore scuro, che coprono frequentemente tutto il cielo nell'inverno e gli danno un'apparenza ondulata. Essi sono talvolta così poco spessi da lasciare intravedere nei loro intervalli l'azzurro del cielo. Spesso si distinguono difficilmente dagli alto-cumuli.

7. *Nembi*. Strati spessi di nubi scure, senza forme nette, a limiti stracciati, che coprono sensibilmente tutto il cielo. Sono le nubi dalle quali cadono le piogge o le nevi persistenti.

8. *Cumuli*. Nubi spesse, di sovente arrotondate, che possono presentare le dimensioni più svariate.

Quando passano davanti al Sole sembrano molto scure e si mostrano con un contorno brillantissimo. Sono cumuli quelle masse a superficie arrotondata che si formano col bel tempo in estate, che aumentano dalla mattina fino alle ore più calde della giornata, per diminuire poi. La loro base è generalmente orizzontale.

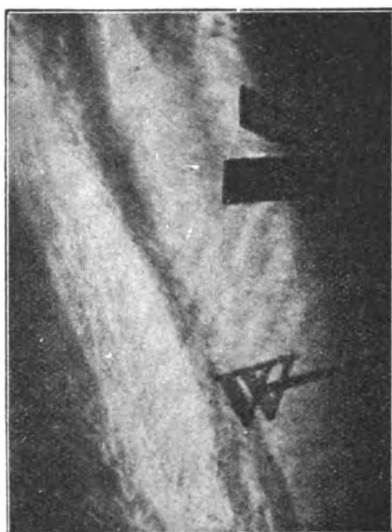
9. *Cumuli-nembi*. Sono nubi formanti masse considerevoli, la cui parte elevata è formata da protuberanze arrotondate in forma di montagne o di torri, la cui base è spesso formata da masse scure simile ai nembi.

I cumuli-nembi sono nubi di pioggia di corta durata.

10. *Strati*. Sono nubi elevate a forma confusa, ma che danno pioggia.

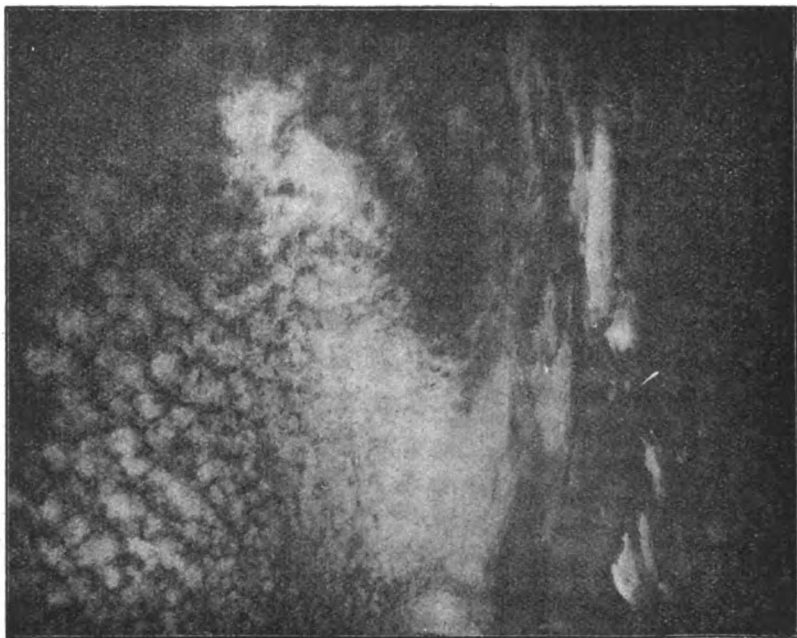
Si vedono spesso galleggiare sul fianco delle montagne. Veduti in distanza all'orizzonte sembrano costituire dei veri e propri strati. Da ciò il loro nome.

La classificazione ora indicata ha il merito di poter essere facilmente appresa dagli osservatori ed anche dai semplici amatori dei fenomeni naturali, i quali tuttavia

Cirri semplici.

Cirri fibrosi.

Cirri riuniti in strati.

Cirri in strisce.

TAV. IX.

Cirri precedenti un temporale.

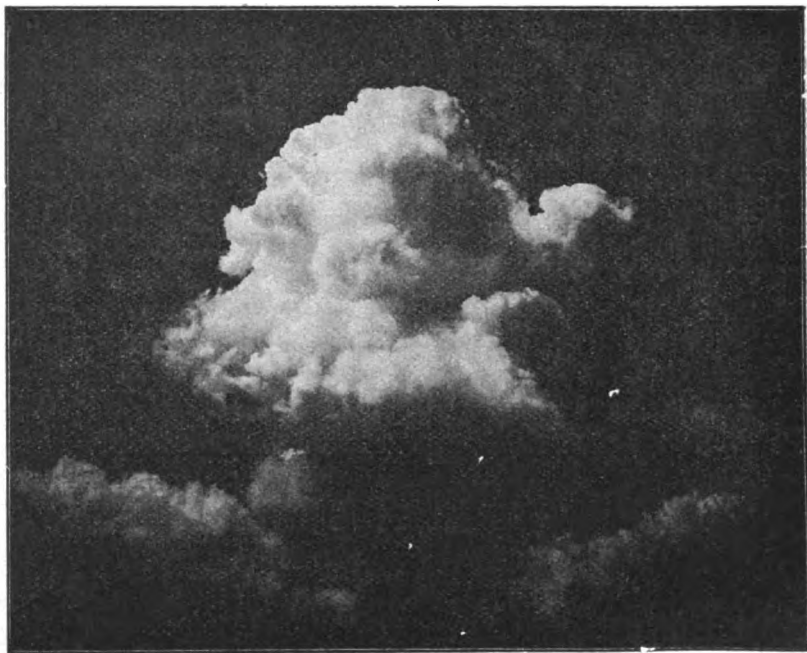
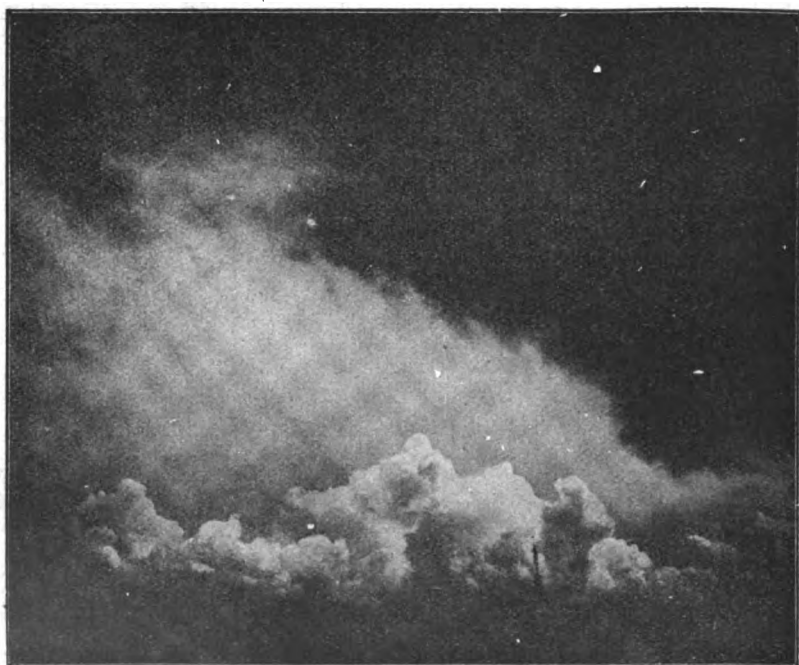
Cirro-cumuli.

Alto-cumuli.

Alto-cumuli e cumuli.

Cumuli (bel tempo).

Cumuli (cattivo tempo).

TAV. XI.

Cumulo-nembi.

Cumulo-nembi e velo di cirro strati.

potranno agevolarsi questo cómpito, valendosi della bella raccolta di fotografie costituenti l'*Atlante internazionale delle Nubi* e curata da una commissione formata dagli uomini più competenti in materia.

Così è stato possibile raggiungere a poco a poco una discreta uniformità nella designazione dei vari tipi di nubi per parte degli osservatori.

Ma le nubi richiedono ben altro; esse costituiscono la sede di fenomeni svariatissimi, e per ciò ora si è manifestato un opportuno risveglio nello studio delle nuvole, che richiede indagini di varia indole e natura.

Nebulosità. — Sotto il punto di vista dello studio dei climi, la valutazione del numero e della frequenza delle nubi è altamente importante: basta per convincersene riflettere a ciò: che un cielo con nubi intercetta i raggi diretti del Sole.

A questo fine si è adottata la considerazione della così detta *nebulosità,* che sta a rappresentare la frazione di cielo coperto in un determinato momento da nubi di qualunque specie. Tale elemento si valuta ad occhio e si rappresenta in cifre da 0 a 10, per modo che ogni unità corrisponda ad $^1/_{10}$ di cielo coperto, da nubi. Così 0 rappresenta un cielo libero da nubi, 5 un cielo per metà coperto, 10 un cielo interamente coperto, 8 un cielo di cui gli $^8/_{10}$ sono coperti.

Per quanto la valutazione della nebulosità venga fatta ad occhio e possa quindi apparire alquanto arbitraria, pure sta di fatto che un po' di esercizio dà agli osservatori diligenti tale sicurezza di giudizio, da rendere concordanti le indicazioni registrate, nel corso anche di un mese, in località vicine.

§ 408. **La pioggia.** — Quando le gocce, che derivano dalla condensazione del vapor acqueo dell'atmosfera, abbiano raggiunto una massa tale da non poter più rimanere sospese nell'aria libera, cadono dando origine al fenomeno ben noto della pioggia.

La formazione della pioggia però per quanto in apparenza sembri un processo abbastanza semplice è ancora ben lungi dall'essere conosciuta in ogni suo particolare. Sappiamo che la causa prima è la formazione di piccole gocce per condensazione del vapor acqueo su di opportuni centri di condensazione. Ma le gocce che così si formano sono necessariamente piccolissime e tali da rimanere sospese nell'aria per effetto di una corrente ascendente anche debolissima, o tutt'al più tali da cadere con velocità molto piccola. Non di rado infatti si vedono delle grosse nubi permanere nel cielo per qualche tempo quasi immobili, o muoversi soltanto in senso orizzontale, finchè ad un tratto qualche goccia comincia a cadere; le goccioline minute, che prima rimanevano sospese, avranno cominciato a riunirsi in aggregati voluminosi e ciò a poeo a poco, per tutta la massa della nube. Con quale processo? Uno potrebbe essere quello che stiamo per esporre e forse lo è senza dubbio, ma non sarebbe l'unico.

Per la dipendenza (alla quale già avemmo occasione di accennare) fra la tensione massima del vapor acqueo, e la curvatura della superficie liquida, da cui può uscire nuovo vapore, si capisce che se due gocce d'acqua di diametri differenti si trovano contemporaneamente in presenza di vapor acqueo, può avvenire che la tensione di quest'ultimo corrisponda al massimo per la goccia più grande ed abbia un valore inferiore al massimo per la goccia più piccola.

In tali condizioni quest'ultima sarà in grado di cedere ancora del vapore all'ambiente; essa dunque evaporerà in parte od anche totalmente, ed il vapore formatosi, essendo in eccesso rispetto alla quantità che può esistere intorno alla goccia maggiore, andrà a condensarsi sopra questa, facendone aumentare sempre più la massa. Ora non è difficile ammettere che fin dall'inizio della formazione di una nube, debbano nascere delle goccioline diverse, sia per differenza di grandezza o di comportamento fra i varii nuclei di condensazione, sia per disuguaglianze di temperatura. Comincierà allora un vero processo di distillazione, il quale farà crescere le gocce maggiori a spese di quelle più piccole, sinchè le prime, diventate abbastanza grandi per superare la resistenza dell'aria, comincieranno a cadere.

È poco probabile però che questo processo possa bastare da solo ad alimentare una pioggia abbondante.

Esso, che forse interverrà specialmente nelle prime fasi di una pioggia, sarà accompagnato in seguito dall'altro, per cui le gocce maggiori, cadendo più rapidamente delle altre, raggiungeranno queste ultime, unendosi ad esse. Infatti si osserva qualche volta, quando piove lungo il pendìo di una montagna, che in alto le goccioline di pioggia sono minutissime e crescono di dimensione man mano che si arriva a regioni più basse.

Questo modo di vedere sembra confermato da recenti ricerche del Lenard sulla frequenza relativa delle gocce di varie grandezze e sulle velocità finali di caduta di queste gocce.

Classificazione delle piogge. — Secondo quanto avemmo occasione di dire, la condensazione del vapor acqueo e quindi la pioggia si deve quasi esclusivamente all'azione di raffreddamento, dovuta alla dilatazione che accompagna i moti ascendenti dell'aria.

Secondo l'origine dei movimenti ascendenti che danno poi origine alle piogge, queste si possono distinguere in *piogge di convezione, cicloniche* e *di rilievo.*

Le prime sono dovute alle correnti ascendenti regolari, conseguenza dei movimenti generali dell'atmosfera.

Le piogge cicloniche sono prodotte dai movimenti ascendenti che accompagnano le perturbazioni dello stato dell'atmosfera.

Le piogge di rilievo sono prodotte dai movimenti ascendenti di origine puramente locale, che nascono quando una corrente d'aria viene ad urtare i rilievi del suolo, le catene di montagne.

Misura della quantità di pioggia. — La pioggia è un elemento meteorologico assai importante sul conto del quale interessa, per ogni luogo di osservazione eseguire misure di quantità e di frequenza.

Quanto alla frequenza non si hanno che a constatare i giorni di pioggia.

La quantità di pioggia che cade a terra viene misurata dal *pluviometro,* e la si esprime coll'altezza (in millimetri) che raggiungerebbe nel suolo, qualora non vi fosse alcuna causa di dispersione.

Il pluviometro più in uso negli osservatorî meteorici italiani consiste in un serbatoio della capacità di circa 10 litri, munito nel fondo di una chiavetta, e sostenuto con un tripode alto più di un metro, per evitare che vi cadano le gocce d'acqua rimbalzate dal suolo. Sul serbaroio si adatta il collettore della pioggia, cioè un imbuto, provveduto di una reticella filtrante al fondo e di un anello circolare nell'orlo. L'anello è disposto in un piano orizzontale, e la sua area, ben determinata, costituisce la superficie del pluviometro. Se l'area dell'anello, è come di solito, di 10 dm^2, ad ogni litro d'acqua raccolta in un recipiente sottostante alla chiavetta corrisponderanno 10 millimetri di pioggia in altezza.

Misure numerose e ripetute di quantità di pioggia nei diversi luoghi della superficie della Terra hanno condotto alla costruzione di carte pluviometriche, atte a rappresentare la distribuzione della pioggia nel globo. Noi ci limiteremo a notare che in generale la pioggia è più abbondante sulle coste che non nell'interno del continenti.

La quantità d'acqua che cade nelle ventiquattro ore nell'Italia centrale non suol superare i trenta millimetri; raramente essa sale a cinquanta e solo in casi eccezionali si avvicina a sessanta millimetri. Quando però si abbiano forti acquazzoni quest'ultima misura può venir sorpassata. La quantità annua non supera per solito i mille millimetri. I mesi nei quali cade la maggior quantità di pioggia sono il settembre e l'ottobre; dopo vengono il marzo e l'aprile. Il mese meno piovoso è l'agosto.

La *neve* si forma per la congelazione dell'acqua che si trova allo stato di vapore. I fiocchi di neve si compongono di aghetti di ghiaccio, raggruppati generalmente in modo da formare delle stelle a sei raggi, a ciascuno dei quali raggi sono fissati spesso altri aghi più piccoli, in modo da assumere le più svariate apparenze.

Una meteora acquea molto importante per i gravi danni che può arrecare, e che ha dato e dà molto filo da torcere agli studiosi desiderosi di sapere come si formi, è la *grandine.* Si tratta della precipitazione di ammassi sferici od ovoidali di ghiaccio, formati da strati concentrici alternativamente translucidi e trasparenti. Talvolta raggiungono dimensioni considerevoli: quelle di un uovo ad esempio.

Quando si ha la grandine fa quasi sempre temporale; ma quale sia l'origine della grandine nessuno sa ancora. Si è tentato, col perturbare mediante azioni considerevoli, quale è il lanciamento, mediante cannoni appositi, di anelli vorticosi di fumo simili a quelli che abili fumatori sanno produrre nell'emettere dalla bocca il fumo, di sconvolgere l'incognito processo di formazione della grandine nelle nubi grandinigene.

Tale processso, puramente empirico, ebbe un tempo la fiducia generale. Ora è in abbandono, ma vi sono ragioni per credere che lo si ritenterà e tornerà di moda. Perchè la condanna della scienza contro di esso non fu assoluta nè generale, e perchè la grandine, essendo troppo funesta all'agricoltura, ci costringe a ricercare tutti i mezzi possibili, onde scongiurarne i disastrosi effetti.

Speriamo che in avvenire la scienza possa indagare a fondo il fenomeno, sul conto del quale sono state emesse una trentina almeno di ipotesi. Chissà che un aereoplano, munito di efficace protezione dagli effetti del fulmine, non consenta presto di andare a scrutare nel seno stesso di un nembo grandinigeno il processo di formazione dei problematici grani.

È noto come si trovino spesso al mattino coperti di piccole goccioline di acqua

gli oggetti esposti all'aria. Essi costituiscono la così detta *rugiada*, e non provengono da una caduta di pioggia durante la notte, tanto è vero che queste gocce si formano soprattutto abbondanti nelle notti serene. Appena il Sole è sceso sotto l'orizzonte, si intensifica la perdita, già iniziatasi, di calore da parte del nostro globo, che durante il giorno era stato riscaldato dai raggi solari, e a poco a poco la temperatura del suolo può abbassarsi molto nel corso della notte, così da condensare il vapore acqueo contenuto nello strato d'aria prossimo ad esso. Se non si osserva rugiada sotto gli alberi e nei luoghi coperti, ciò dipende dal fatto che ivi, in virtù della protezione, si rende meno intenso il raffreddamento.

La rugiada non si forma indifferentemente su tutti i corpi; i metalli che hanno un debôle potere emissivo si raffreddano poco e sono raramente coperti di rugiada; l'erba, le foglie, che hanno un grande potere emissivo e che non possono spesso, in conseguenza della loro debole conducibilità, ricevere dal suolo il calore che perdono incessantemente, sono molto più frequentemente coperte di rugiada. Un vento leggero favorisce in generale la formazione di rugiada, rinnovando lentamente l'aria, che deposita sulle superfici raffreddate il vapor acqueo che essa contiene. Al contrario, un vento violento rende impossibile il deposito della rugiada: l'aria, rinnovandosi rapidamente, riscalda il suolo col suo contatto, senza avere il tempo di raffreddarsi in modo sensibile.

Se la temperatura del suolo, per il raffreddamento notturno, scende al di sotto di 0°, il vapor acqueo dell'aria invece che condensarsi in goccioline può deporsi allo stato solido cristallino. Si ha allora la *brina*. Questa può costituire le note gelate primaverili, spesso funeste ai raccolti. Quando il cielo è molto sereno e verso sera si ha una temperatura bassa, così da far prevedere la gelata, gli orticultori ricoprono le loro piante di paglia ed i viticultori, nel corso della notte, producono delle nubi di fumo bruciando della paglia umida cosparsa di materia bituminosa. Son questi mezzi atti a rallentare la irradiazione e conseguentemente il raffredamento notturno; si rende così più difficile il formarsi della gelata.

Pei campi si ricorre con profitto alle così dette *nubi artificiali*, le quali si ottengono bruciando sostanze resinose, come le meglio adatte a formare una fiamma fuligginosa.

CAPITOLO XLIII.

I FENOMENI OTTICI DELL'ATMOSFERA.

409. **Colore del cielo.** — Il primo fatto di ottica atmosferica che si presenta alla nostra considerazione è la colorazione azzurra del cielo, tanto più pura quanto più ci si avvicina allo zenit e tanto meno quanto più ci approssima all'orizzonte.

Tale colorazione si attribuisce alle piccole particelle che l'aria tiene in sospensione e alle molecole stesse costituenti l'aria, tanto da pensare che se queste particelle o queste molecole mancassero non si avrebbe luce che in direzione diretta degli astri e questi ci apparirebbero ben luminosi e con contorno ben definito in campo oscuro. Non apparisce forse tanto più scura la volta celeste quanto più ci si eleva nell'atmosfera e quanto quindi è minore il pulviscolo disseminato nell'atmosfera stessa?

Quando la luce generale proveniente dal Sole penetra nell'atmosfera si manifesta subito negli elementi costituenti questa il fenomeno di diffusione, e ciò in misura differente per le diverse lunghezze d'onda delle luci semplici costituenti la luce solare per le differenti dimensioni degli elementi suindicati. Certuni ad esempio avranno così piccole dimensioni da lasciar passare tutte le radiazioni di lunghezza d'onda superiore a quella della luce violetta e da riflettere o diffondere tale luce violetta. Ed è ovvio che la diffusione *interna* operantesi nell'atmosfera sarà più abbondante per le radiazioni di minor lunghezza d'onda, prossima al violetto.

La luce diffusa nell'atmosfera dovrà quindi essere più ricca di queste radiazioni che non di quella a maggior lunghezza d'onda e apparisca quindi azzurra.

È evidente che nella direzione stessa del Sole l'effetto di diffusione sarà minimo, perchè esso è più grande dove i raggi luminosi saranno per un maggior numero di volte rimbalzati da particella a particella.

Quando il Sole o la Luna sono prossimi all'orizzonte, i raggi luminosi traversano uno spessore molto grande di aria (per lo zenit è verificata invece la condizione di minimo spessore) che per giunta è più dell'altra carica di polveri. La diffusione è quindi

molto intensa e poichè tende a rigettare lontano i raggi dell'estremo violetto, il cielo apparisce giallo o rosso e l'astro rosso. Tali colorazioni sono tanto più intense, quanto più l'aria è prossima alla saturazione e carica di piccole goccioline producenti la diffusione.

Se le dimensioni delle goccioline cresce, la diffusione si fa sentire anche pei raggi del primo estremo dello spettro e la tinta del cielo tende quindi ad un colore biancastro e diventa bianca se le gocce diventano sufficientemente grosse e numerose.

La relazione fra colore del cielo e numero e grossezza delle particelle e goccioline sospese nell'aria è evidente, donde lo speciale interesse che presenta il colore del cielo sotto il punto di vista meteorologico.

§ 410. **Arcobaleno.** — Uno dei più bei fenomeni ottici dell'atmosfera è l'*iride* o *arcobaleno*. Perchè si produca questo fenomeno, è necessaria la presenza del Sole sull'orizzonte, una nube che si risolva in pioggia e che l'osservatore sia situato fra il Sole e la nube. Quando le condizioni si verificano guardando in direzione opposta a quella del Sole si vede una striscia luminosa circolare il cui centro si trova sulla linea che va dal Sole all'occhio dell'osservatore e presentante i colori dello spettro, il violetto nell'interno ed il rosso all'esterno. Si può scorgere anche un secondo arco concentrico col primo, ma più grande, più largo e meno luminoso, nel quale la disposizione dei colori è inversa (rosso all'interno e violetto all'esterno). Fra i due archi il cielo è più scuro che altrove. Talvolta, ma raramente, esistono *archi sopranumerari* colorati alternativamente in violetto ed in verde, al disotto del primo arco e, più raramente, anche al disotto del secondo.

Fig. 559.

Questo fenomeno è prodotto dai raggi luminosi che giungono all'occhio, dopo che nelle gocce di pioggia si sono decomposti con due rifrazioni, l'una entrando e l'altra uscendo, non senza aver subite fra esse una o più riflessioni interne. L'arco inferiore, i cui colori sono più vivi, ha una larghezza apparente di 1°,45'; l'altro arcobaleno (esterno) corrispondente a 2 riflessioni interne ha una larghezza di 3°,10; la distanza fra i due archi è di 8°,57'. La teoria indica (ma in natura generalmente non si osservano) archi corrispondenti a 3, 4, 5 riflessioni interne. Quando fosse visibile un terzo arco, l'ordine dei colori è lo stesso che nel primo, e così di seguito.

Il caso di una semplice riflessione interna è rappresentato dalla Fig. 559, nella quale *SI* rappresenta il raggio solare incidente. Questo raggio nella ripetuta rifrazione in *I* ed *I'* (all'emergenza) subisce la decomposizione e la deviazione dalla direzione primitiva *SI*. Tale deviazione è poi diversa a seconda dell'angolo di incidenza, ed i fascetti delle luci semplici uscenti dalla gocciola riescono generalmente sparpagliati e non determinano sufficiente impressione nell'occhio. L'angolo supplementare di quello segnato in *O* che formato da uno di questi fascetti *I'O* di raggi efficaci colla direzione che va dal Sole all'occhio *O* dell'osservatore dicesi *angolo di deviazione*. Per ogni specie di raggi però vi ha un angolo di incidenza che dà la minima deviazione e per gli angoli di incidenza prossimi ad esso la deviazione cambia di pochissimo e quindi i fascetti di raggi dello stesso colore possono

Fig. 560.

ritenersi paralleli: l'occhio ne riceve sufficiente impressione. Sono dunque *raggi efficaci* per la osservazione del fenomeno quelli corrispondenti ad incidenze prossime alla incidenza per la quale si ha la deviazione minima.

La teoria prova che la deviazione minima pel caso di una sola riflessione interna è di 137°58′ per i raggi rossi e di 139°43′ per i violetti. L'arcobaleno si presenterà dunque (perchè tutto deve avvenire come in OI' sulla superficie conica di asse $S'O$ e di direttrice OI') come una striscia formata di archi circolari contigui il cui raggio apparente varia da 40°17′ per i raggi violetti a 42°2′ per i rossi (supplemento dei precedenti angoli di deviazione). Di più, tutti i raggi rinviati dalle gocce in una direzione diversa da quella dei raggi efficaci saranno più deviati di questi ultimi e per conseguenza rinviati al di dentro dell'arco. La parte del cielo interna all'arco riceve dunque in più dell'illuminazione generale del cielo un certo numero di raggi rinviati dalle gocce e quindi sarà più luminoso della esterna.

Fig. 561. - Rappresentazione esagerata dei fenomeni che conducono alla manifestazione dell'arcobaleno.

Il secondo arco si attribuisce a due riflessioni interne (Fig. 560). L'angolo analogo a quello in O del caso precedente è per questo secondo arco di 50°59′ in corrispondenza dei raggi rossi e di 54°9′ in corrispondenza dei raggi violetti: il rosso è di dentro e il violetto al di fuori.

Tutti i raggi che non sieno gli efficaci sono nel caso del secondo arco, rinviati al disopra di esso. Quando i due archi si mostreranno simultaneamente, l'intervallo che li separa apparirà dunque più scuro del resto del cielo, perchè le gocce di pioggia non vi inviano raggi in più della illuminazione generale.

Fig. 562. - Esperienza di scuola facile da eseguire e riproducente le apparenze dell'arcobaleno.

È ovvio che gli arcobaleni non possono osservarsi se il Sole non ha altezza sufficiente sull'orizzonte. Se questa altezza oltrepassa i 42° il primo arco è tutto al disotto dell'orizzonte. Lo stesso succede per il secondo arco se l'altezza del Sole supera i 51°. Si vedono anche arcobaleni lunari, ma con deboli colori. Il fenomeno degli archi colorati si manifesta anche allorchè uno si trova fra il Sole e la nebbia prodotta dagli spruzzi d'acqua del getto di una cascata. Volgarmente si ritiene che l'arcobaleno preconizzi il ritorno del buon tempo: da esso nessun pronostico può trarsi se non l'indicazione che cade della pioggia nella direzione ove lo si scorge.

§ 411. **Corone.** — Così si chiamano dei cerchi od anelli colorati, che si mostrano attorno al Sole od alla Luna a breve distanza. Le corone solari non possono spesso osservarsi direttamente per il troppo vivo splendore del Sole. Occorre l'uso di un vetro colorato. Il fenomeno si produce tutte le volte che dinanzi al Sole od alla Luna passa una nube poco spessa, composta di piccole gocce aventi diametri di poco diffe-

renti. Può facilmente riprodursi guardando una sorgente luminosa attraverso ad una lastra di vetro sulla quale si sia alitato o cosparsa uniformemente della polvere di licopodio. Si tratta di un fatto di diffusione esaurientemente spiegabile.

I diametri degli anelli luminosi sono proporzionali alla lunghezza d'onda della luce che li costituisce ed in ragione inversa del diametro delle gocce.

§ 412. **Aloni.** — Si tratta di fenomeni luminosi più o meno complessi di cerchi ed archi luminosi, dischi luminosi su questi disseminati, che si verificano intorno al Sole ed alla Luna e che nel loro insieme vengono rappresentati dalla Fig. 563. Si spiegano nelle loro varie manifestazioni con la rifrazione e la riflessione della luce nei cristalli di ghiaccio che costituiscono le nubi della famiglia dei cirri e dei cirrostrati.

Fig. 563.

I fenomeni della famiglia degli aloni sono interessanti, oltre che dal punto di vista teorico, anche dal punto di vista pratico, giacchè attestano la presenza di nubi ghiacciate, foriere nelle latitudini medie, di cattivo tempo. Le principali manifestazioni sono:

1. L'*alone ordinario*, cerchio *A* circondante il Sole, allo interno rosso, poi giallo, poi bianchiccio, avente 22° di raggio interno.

2. L'*alone straordinario o grande alone*, cerchio *B* concentrico al precedente, di 46° di raggio, meno luminoso ma coi colori spettrali meglio separati.

3. Il *cerchio parielico*, striscia orizzontale *CC'*.

Fig. 564.

4. I *parieli di 22°* (o *parascleni* se l'astro è la Luna). Chiazze circolari *PP'* brillantissime e colorate.

Fig. 565.

5. I *parieli secondari QQ'*.

6. L'*arco circumzenitale*. L'arco *DED'*.

7. Le *colonne* di luce verticali e passanti pel Sole *VV'*.

8. Gli *archi tangenti* (*MNM'*, *TUT'*, *GH*, *G'H'*).

9. L' *alone ellittico circoscritto* all'alone di 22° (*KK'*).

§ 413. **Crepuscolo.** — Il *crepuscolo*, ossia quel fenomeno dovuto alla rifrazione, pel quale la luce solare splende nell'atmosfera un poco prima della levata ed un poco dopo il tramonto dell'astro da cui proviene.

§ 414. **Rifrazione atmosferica.** — Siccome gli strati successivi nei quali può ritenersi divisa l'atmosfera, hanno, a misura che ci si eleva, indici di rifrazione decrescenti; un raggio di Sole che penetri nell'atmosfera vi segue la strada indicata dalla Fig. 564. L'astro, guardato da un osservatore posto in M, sembra situato in S', vale a dire più sollevato nel cielo. Questa deviazione che è nulla allo zenit può raggiungere un valore assai grande per un astro situato all'orizzonte.

Così il Sole e la Luna al loro sorgere, per effetto della sola rifrazione atmosferica, appaiono per intero all'osservatore, mentre soltanto il lembo superiore dell'astro ha raggiunto l'orizzonte. Così al tramonto l'astro apparisce ancora per intero, mentre è già sceso per intero al disotto dell'orizzonte.

Fig. 566. - Come apparisce deformato per effetto della rifrazione atmosferica il Sole al tramonto.

§ 415. **Aurora polare.** — Si dà questa denominazione ad un bel fenomeno di luminosità del cielo presentante manifestazioni varie, che di frequente si osserva nelle regioni polari, raramente nelle nostre, attribuito ad un fenomeno di quieta scarica elettrica nelle regioni rarefatte dall'atmosfera. Si chiama *boreale* nell'emisfero nord ed *australe* nel sud. La denominazione di aurora poi le si deve perchè diffonde un chiarore simile a quello dello spuntare del Sole.

Fig. 567.

Nelle regioni polari è provvidenziale, perchè vi rischiara le lunghe notti.

Fig. 568. - Fenomeno di miraggio cui suol darsi il nome di *fata morgana.*

§ 416. **Miraggio e fata morgana.** — Il *miraggio*, è quel fenomeno pel quale appaiono scintille al di sotto del suolo od anche nell'aria immagini di oggetti lontani. Nelle linee generali si spiega colla riflessione totale dei raggi luminosi successivamente rifratti nei vari strati d'aria di diversa densità. Le immagini poi si vedono in basso od in alto, secondochè la

Fig. 569. - Miraggio propriamente detto.

temperatura del suolo è maggiore o minore di quella dell'aria. Spesso il *miraggio* è complesso perchè dà varie immagini.

Lo si chiama *fata morgana* nella sua classica manifestazione nello stretto di Messina. Le figure 568 e 569 danno sufficienti spiegazioni del fenomeno.

§ 417. **Scintillazione delle stelle fisse.** — Il noto fenomeno della scintillazione delle stelle, che consiste in cambiamenti di splendore e di colore, si attribuisce ad un fatto di interferenza. I raggi provenienti all'occhio dalla stella percorrono in generale delle strade vicine, ma pur diverse per la temperatura, la pressione, lo stato igrometrico ecc. e quindi alcuni possono, percorrere o ritardare su gli altri, e quindi dar luogo al fenomeno dell'interferenza rendendo anche colorata la luce risultante. Il fenomeno è assai più manifesto col cannocchiale che non ad occhio nudo.

CAPITOLO XLIV.

FENOMENI ACUSTICI NELL'ATMOSFERA.

§ 418. L'acustica atmosferica ha limitatissimo sviluppo, e, forse, non hanno torto coloro che vorrebbero rivolta ad essa maggiore attenzione.

Il suono, propagandosi per moto ondulatorio attraverso all'aria, va soggetto ai fenomeni di riflessione, di rifrazione, di diffrazione ecc.

Per la riflessione si possono verificare e si verificano difatti effetti notevoli di *eco* specialmente in conseguenza dell'intervento di nubi. Se all'altezza di 80 chilometri l'aria (§ 400) modifica profondamente abbassandola, la densità, potranno inoltre attendersi effetti di riflessione totale.

Fig. 570.

In occasione della esplosione della dinamite della strada ferrata della Jungfran, avvenuta il 15 novembre 1908, la esplosione fu nettamente sentita in una zona di 20 chilometri attorno al luogo ove avvenne. Attorno a questa zona se ne ebbe una della estensione di 100 chilometri detta dagli ingegneri della ferrovia *zona di silenzio*. Ma al di là della zona di silenzio si manifestò un'altra zona nella quale il rumore della esplosione fu avvertito (*zona di rumore*). La cosa può spiegarsi ammettendo, come mostra la figura, un fenomeno di riflessione totale al limite inferiore dell'atmosfera. Col calcolo si può giustificare anche quantitativamente la manifestazione del fenomeno ammettendo che la superficie riflettente fosse ad un'altezza di 75 chilometri.

Da tempo, in certe località specialmente nel Senese e nelle Marche, si è rivolta l'attenzione degli studiosi a rumori lontani, boati, senza causa apparente, ai quali si dà il nome di *brontidi*. Nessuno sa darne ancora spiegazione soddisfacente.

Altri fatti di acustica atmosferica sono: la migliore percezione del suono attraverso ad aria fredda che attraverso ad aria calda e la migliore percezione dei suoni provenienti da luoghi a maggiore densità di aria che non da luoghi a minore densità, dal basso verso l'alto che non dall'alto verso il basso.

CAPITOLO XLV.

L'ELETTRICITÀ ATMOSFERICA.

§ 419. **Dispersione elettrica atmosferica.** — Se si abbandona all'aria libera un conduttore carico ed isolato, esso perde progressivamente la propria carica, anche nelle più assolute condizioni di isolamento del corpo. Tale fatto si produce per effetto dell'aria, che apparisce parzialmente ionizzata.

Si è discusso a lungo sulla causa della ionizzazione dell'atmosfera ed oramai sembra posto fuori dubbio che essa dipenda dalla esistenza nel globo di considerevoli quantità di materiale radioattivo, capace di operare la ionizzazione.

Tale ionizzazione si effettuerebbe principalmente nelle cavità del terreno e l'aria così ionizzata, dovendo passare per uscire all'esterno attraverso a canali più o meno stretti, trascinerebbe in prevalenza ioni positivi, perchè buona parte dei ioni negativi rimarrebbe fissata sulle pareti dei canali stessi e darebbe una carica negativa alla Terra.

Va notato come qualcuno pensi che l'azione ionizzante abbia il punto di partenza (per effetto di una radiazione ionizzante esistente nell'atmosfera o dovuta a materiale radioattivo dell'atmosfera) nell'atmosfera; e che Arrhenius e altri ritengono che la si debba ad una radiazione proveniente dagli spazi interplanetari, probabilmente dal Sole.

Nei più è radicata la persuasione che l'origine prima della ionizzazione dell'aria debba ricercarsi in materiale radioattivo contenuto nel suolo. Nulla però ancora dimostra che questa ne sia l'unica causa.

§ 420. **Campo elettrico nell'atmosfera.** — Mettendo in comunicazione con un elettrometro o con un elettroscopio sensibile una fiamma o un disco di metallo cosparso di materiale radioattivo, si ha modo di valutare il potenziale elettrico dell'aria nel luogo ove si trova la fiamma o il disco col materiale radioattivo (genericamente l'uno e l'altro si chiamano *collettori* di elettricità). Orbene, accurate misure eseguite nell'atmosfera calma e trasparente hanno portato a stabilire che il potenziale elettrico nei vari punti dell'atmosfera considerati lungo una verticale cresce colla altitudine. Si ha quindi attorno al nostro globo un campo elettrico quale si avrebbe attorno ad una sfera isolata e carica di elettricità negativa. Ciò ha fatto pensare che il nostro globo abbia una carica negativa propria e che, per essere il globo buon conduttore, sarà distribuita alla sua superficie.

In vicinanza della superficie della Terra la variazione del potenziale secondo l'altezza è di circa 100 *volta* per ogni metro di elevazione.

Il valore del potenziale atmosferico in un luogo determinato subisce delle variazioni regolari oltrechè delle pronunciatissime variazioni irregolari, dovute queste ultime a perturbazioni atmosferiche.

§ 421. **Fulmine, lampo, tuono.** — L'atmosfera è sede sempre di fenomeni elettrici: son calmi e tranquilli quando essa è quieta e serena, son violenti e fragorosi quando nubi gravi ed agitate la solcano in determinate condizioni.

Esperienze eseguibili con semplici elettroscopi provano la prima parte della nostra asserzione, della quale già ci occupammo nei precedenti paragrafi. Osservazioni ripetute di ognuno mettono fuori di dubbio la seconda parte, quando si sappia che i fulmini, come primo dimostrò nel 1738 Beniamino Franklin, altro non sono che gigantesche scintille elettriche. Si dà loro più propriamente il nome di *folgori*, se invece di prodursi fra nube e nube si producono fra nubi e terra; come si chiama in genere *lampo* il fenomeno luminoso che li accompagna e *tuono* il rumore della scarica.

Quando la folgore cade presso un osservatore, il tuono si sente nel momento istesso in cui apparisce il lampo; ma in caso contrario il tuono si sente dopo che è apparso il lampo, quantunque il fenomeno luminoso e quello sonoro si producano simultaneamente,

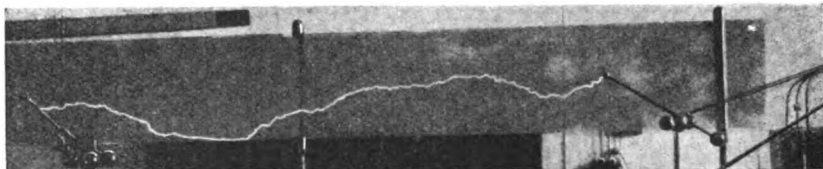



Fig. 571.

perchè il suono mette un certo tempo e la luce un tempo inapprezzabile ad attraversare la distanza che separa l'osservatore dal luogo in cui si sono prodotti i due fenomeni.

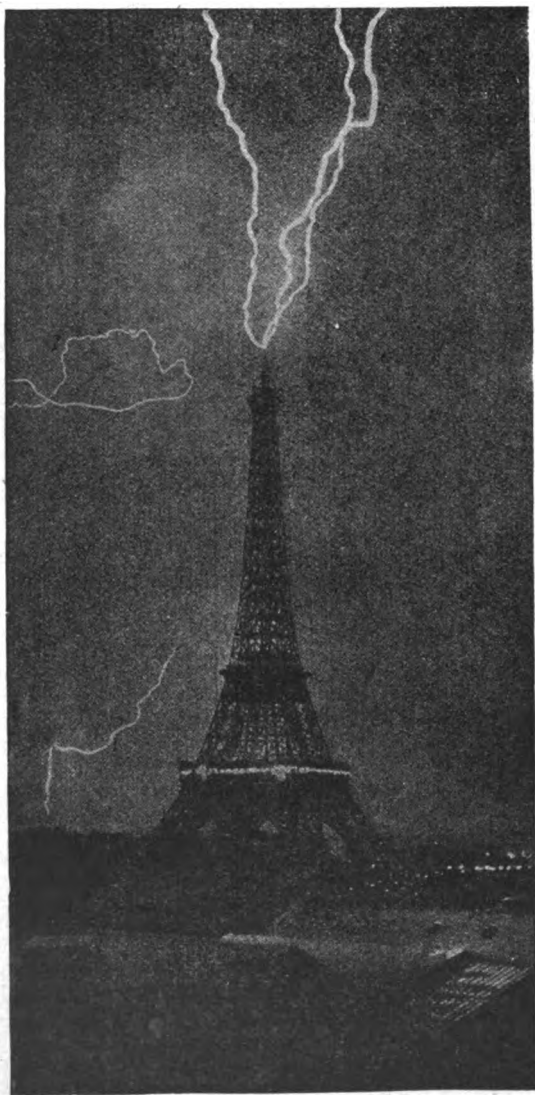



Fig. 572. - Fotografia di folgori.

Ripetute riflessioni su montagne e su nubi possono prolungare il tuono, ma spesso quell'effetto di prolungamento e di ripetizione consegue da ciò: che la folgore è dovuta ad una successione di scintille producentisi fra una serie di piccole nubi. Di lontano si vedono male questa discontinuità del fenomeno luminoso che sembra continuo; ma le scintille parziali che lo formano, se si producono simultaneamente, o quasi, si producono di solito a distanze differenti dall'osservatore, cosicchè questo intende successivamente il rumore, tanto più tardi quanto più sono lontane.

Per la produzione delle scariche elettriche bisogna che le nubi abbiano cariche elettriche forti, siano cioè nubi temporalesche.

Senza inoltrarci nella questione non facile e non interamente risolta dell'origine delle cariche elettriche nelle nubi, ci basti sapere che le nubi possono essere fortemente cariche di elettricità positiva o di elettricità negativa.

Nessuna meraviglia quindi che avvicinandosi due nubi, una carica positivamente, e l'altra negativamente, si produca fra di esse una poderosa scintilla, e che una poderosa scintilla si produca fra la terra ed una nube che a quella si accosti carica positivamente o negativamente.

I lampi hanno di frequente un andamento sinuoso e ramificato e raggiungono talvolta distanze da 15 a 20 chilometri. Con questa che non deve sorprendere se si pensa che l'intervallo compreso fra nubi temporalesche è generalmente occupato da una nebbia formata da goccioline sospese nell'aria: la scarica fa ponte da una gocciolina alla successiva e raggiunge così percorsi considerevoli.

Una esperienza che imita que-

sto fatto suol essere eseguita nella scuola del professore Augusto Righi. La scarica di una batteria di condensatori, che nell'aria libera potrebbe dare una scintilla di pochi centimetri, trovando appoggio in granelli conduttori incollati su lastre di vetro, raggiunge la lunghezza di m. 4,50.

Il prof. Righi ha pure imitato con una esperienza di laboratorio una forma specialissima di scarica elettrica atmosferica, intorno alla quale ancora ben poco si sa, e consistente nell'ascesa lenta dal suolo di una massa globulare luminosa. Di frequente questa massa, raggiunta che abbia una certa altezza, produce uno scoppio e si dissipa. Si chiama tale scarica, di cui ogni tanto si ha qua e là manifestazione sorprendente, *folgore globulare*.

Quando una folgore cade, essa colpisce di preferenza i corpi più elevati, i campanili, le torri, gli alberi isolati in mezzo al piano, ragione per cui da lungo tempo si avverte che questi rifugi debbono evitarsi durante un temporale.

Sul conto degli effetti della folgore va notato come, salvo per la intensità loro, enormemente più grande, non differiscano da quelli delle ordinarie scariche elettriche di laboratorio. Sono effetti meccanici capaci di rompere pietre, di schiantare alberi; effetti calorici capaci di fondere fili conduttori, come quelli dei campanelli elettrici, di volatilizzare dorature, di accendere materie combustibili; effetti chimici capaci di determinare la formazione di acido nitrico nelle piogge temporalesche e la trasformazione dell'ossigeno dell'aria in ozono; effetti fisiologici determinanti alle volte lesioni gravissime con morte, e certe volte la morte senza lesioni apparenti.

§ 422. **Contraccolpo.** — Può spesso avvenire che l'uomo e gli animali siano vittime della folgore senza esserne direttamente colpiti: è il fatto detto di contraccolpo. Supponiamo che una nube carica, ad esempio di elettricità positiva, passi a piccola distanza dal suolo: essa agisce per influenza sui corpi conduttori situati alla superficie della terra suscitando in essi elettricità negativa, e nel suolo, a distanza, elettricità positiva. Se, mentre si esercita questa influenza, succede che la nube si scarichi in altro punto, vi ha un immediato ritorno allo stato neutro dei corpi soggetti alla influenza, donde negli animali una commozione che può determinare la morte.

§ 423. **Parafulmini.** — Franklin ebbe primo l'idea di proteggere gli edifici dalla folgore, mediante un sistema che egli chiamò *parafulmine*, e che per distinguerlo da un altro sistema, di cui diremo più avanti due parole, chiameremo parafulmine francliniano.

Si compone di un'asta verticale di ferro terminata in alto (Fig. 573) con una punta di metallo inossidabile e comunicante col suolo mediante un grosso conduttore metallico.

L'estremità di questo conduttore sopporta una lastra di rame o

Platino
Rame
Ferro

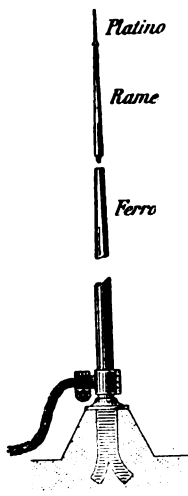
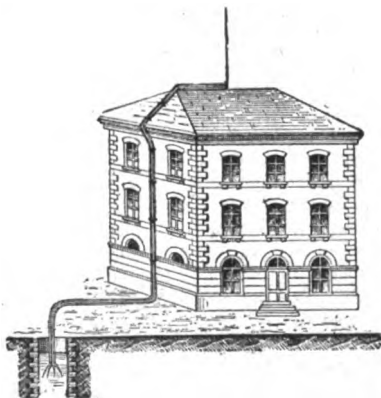
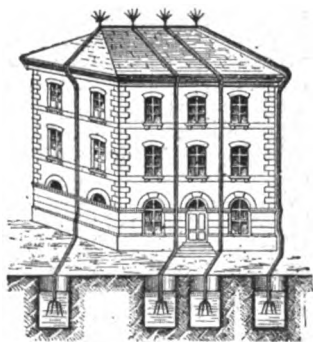



Fig. 573. *Fig. 574.* *Fig. 575.*

immersi in un pozzo o infissi in suolo umido (Fig. 574), un sistema di fili. L'ufficio del parafulmine è duplice:

1. Ha un effetto preventivo, perchè la punta collegata col suolo scarica per influenza le nubi elettrizzate che le passano al di sopra, come una punta tenuta per mano scarica per influenza un conduttore isolato vicino.

2. Allorchè la folgore cade, colpisce di preferenza il parafulmine che domina l'edificio, segue l'asta conduttrice e si perde nel suolo.

Perchè però questi due uffici si compiano bene, occorre che sia ben stabilita la comunicazione col suolo e con le grosse masse metalliche che si trovino nell'edificio. Si è presa come regola per la posa di parafulmini sugli edifici, che un parafulmine protegge un cono avente per vertice la punta di quello ed un raggio di base uguale al doppio della distanza fra la punta ed il piano di base considerato; ma questa regola, che si sente tanto spesso ripetere come cosa indiscutibile, non riposa su nessun dato certo. Del pari non va accettata l'asserzione che un parafulmine francliniano ben costruito protegga nel modo più assoluto l'edificio sul quale è adattato. L'esperienza mette invece fuori di dubbio che in qualche caso il parafulmine francliniano fallisce nella sua missione, e la scienza ha già indicate le ragioni consistenti principalmente in ciò che frequentemente le scariche atmosferiche sono oscillatorie. Poichè per queste scariche il dispositivo del Franklin non è soddisfacente, la scienza ha provveduto ai ripari, col suggerire, quale mezzo di protezione più efficace, la chiusura dell'edificio in una gabbia comunicante col suolo, per utilizzare il fatto che nell'interno di un conduttore comunicante col suolo non si fanno sentire le azioni esteriori per quanto violente. Tale chiusura si pratica come mostra la Fig. 575 con conduttori metallici verticali ed orizzontali (in minor numero) collegati fra loro ed in buona comunicazione col suolo. Si adattano poi in alto aste terminanti con punte metalliche.

§ 424. **Fuochi di S. Elmo o di S. Nicola.** — Sono sprazzi luminosi che escono talvolta dagli alberi delle navi, dalle punte metalliche, da corpi vari sporgenti. Li osservò anche lo storico Plinio. Si attribuiscono al noto fatto della scarica delle punte.

CAPITOLO XLVI.

LA PREVISIONE DEL TEMPO.

§ 425. **Previsioni a lunga ed a breve scadenza.** — Lo stato attuale della scienza distingue due specie di previsioni del tempo: a lunga ed a corta scadenza. Le cognizioni meteorologiche del momento presente non consentono alcuna seria previsione a lunga scadenza, mentre ne permettono a breve, dotate di un buon grado di probabilità. Si chiamano a breve scadenza quelle previsioni fatte per un avvenire non sorpassante le trentasei ore circa (ordinariamente di ventiquattro ore). Si ritengono previsioni a lunga scadenza quelle che vengono riferite a periodi di tempo superiori alle quarantotto ore.

La previsione a breve scadenza che ora può fare la scienza è basata sull'uso delle carte isobariche, di quelle carte geografiche cioè sulle quali sono collegati mediante linee contigue quei luoghi nei quali in un determinato momento, comune per tutti, la pressione atmosferica convenientemente ridotta, risulta uguale. Le curve che su di esse vengono per tal modo a tracciarsi assumono frequentemente distribuzioni tipiche alle quali il meteorologista dà denominazioni speciali. Tali sono i cicloni e gli anticicloni.

Il principio della previsione sulle carte isobariche sta in ciò che il tempo che fa in un momento determinato può desumersi dalla distribuzione delle isobare in quel momento.

Senza indicare minutamente le varie considerazioni che conducono dalla distribuzione delle isobare in un momento a stabilire il tempo che in quel momento fa, possiamo bensì dire che se su una carta isobarica si applica la legge di Buy-Ballot si può fissare la direzione dei venti e dalla umidità e dalla temperatura dell'aria nel luogo al quale ci si riferisce e dalle presumibili condizioni dell'aria che arriva, dedurre la velocità loro, la probabilità e la improbabilità di pioggia ecc.

Ma la distribuzione delle isobare nel momento pel quale si costruisce la carta non sarà in generale quella stessa dell'indomani, nel giorno cioè per cui si vuol fare la previsione, per cui bisogna cercare di prevedere la carta dell'indomani.

L'esame di una carta isobarica qualunque permette ordinariamente di riconoscervi la presenza di uno o due anticicloni, di una o più depressioni ed altre forme isobariche. Si cerca successivamente come si muoveranno, come si modificheranno queste varie forme isobariche, e, nel caso in cui non figurino tutte sulla carta, si esamina se la loro apparizione è o no probabile. Si arriva per tal modo a raffigurarsi la distribuzione isobarica per il giorno al quale si vuol riferire la previsione. Con la presunta distribuzione isobarica si farà poi la previsione secondo le regole alle quali si è alluso più sopra.

INDICE

PARTE I. - DEL CALORE.

CAP. I. - LA TEMPERATURA ED I TERMOMETRI.

CAP. II. - STUDIO DELLE DILATAZIONI.

DILATAZIONE DEI SOLIDI.

DILATAZIONE DEI LIQUIDI.

DILATAZIONE DEI GAS.

CAP. III. - LA FUSIONE E LA SOLIDIFICAZIONE.

CAP. IV. - LE SOLUZIONI.

CAP. V. - MISURA DELLA QUANTITÀ DI CALORE.

CAP. VI. - PRINCIPIO DELLA EQUIVALENZA E NATURA DEL CALORE.

CAP. VII. - VAPORIZZAZIONE - SUBLIMAZIONE - LIQUEFAZIONE.

Cap. VIII. - EQUILIBRIO FRA STATI FISICI DIFFERENTI DI UN MEDESIMO CORPO IN CONTATTO.

Cap. IX. - PROPAGAZIONE DEL CALORE.

IRRAGGIAMENTO.

CONDUZIONE.

CONVEZIONE.

APPLICAZIONI.

Cap. X. - MACCHINE TERMICHE.

PARTE II. - DELLA LUCE.

CAP. XI. - CORPI LUMINOSI ED ILLUMINATI, DIAFANI ED OPACHI.

CAP. XII. - PROPAGAZIONE DELLA LUCE.

CAP. XIII. - FOTOMETRIA.

CAP. XIV. - LA RIFLESSIONE E GLI SPECCHI PIANI.

CAP. XV. - GLI SPECCHI CURVI.

Cap. XXI. - STRUMENTI OTTICI.

Cap. XXII. - L'ANALISI SPETTRALE.

Cap. XXIII. - I FENOMENI DI INTERFERENZA, DI DIFFRAZIONE E DI POLARIZZAZIONE.

DIFFRAZIONE.

DOPPIA RIFRAZIONE E POLARIZZAZIONE.

PARTE III. - DELL'ELETTRICITÀ E DEL MAGNETISMO.

CAP. XXIV. - GENERALITÀ.

CAP. XXV. - IL CAMPO ELETTRICO.

CAP. XXVI. - IONIZZAZIONE DEI GAS.

Cap. XXVII. - MACCHINE ELETTRICHE.

Cap. XXVIII. - PROPAGAZIONE DELLA ELETTRICITÀ.

Cap. XXIX. - I CONDENSATORI.

Cap. XXX. - LA CORRENTE E LA PILA.

Cap. XXXI. - MAGNETISMO.

Cap. XXXII. - ELETTROMAGNETISMO.

Cap. XXXIII. - EFFETTI CALORIFICI E LUMINOSI DELLE CORRENTI ELETTRICHE.

Cap. XXXIV. - AZIONI ELETTRODINAMICHE.

Cap. XXXV. - LE CORRENTI INDOTTE.

Cap. XXXVI. - LE CORRENTI ALTERNATIVE. ALTERNATORI.

Cap. XXXVII. - MOTORI E DINAMO A CORRENTE CONTINUA. MOTORI A CORRENTE ALTERNATA.

Cap. XXXVIII. - CORRENTI BIFASI E TRIFASI. MOTORI A CAMPO ROTANTE.

Cap. XXXIX. - I TRASFORMATORI ED IL ROCCHETTO DI RUHMKORFF. TRASPORTO ELETTRICO DELL'ENERGIA.

Cap. XL. - LE ONDE ELETTRICHE E LE LORO APPLICAZIONI.

Cap. XLI. - FOTOTELEFONIA.

Parte IV. - CENNI DI METEOROLOGIA.

Cap. XLII. - GENERALITÀ - PROPRIETÀ MECCANICHE E FATTI TERMICI DELL'ATMOSFERA.

Cap. XLIII. - I FENOMENI OTTICI DELL'ATMOSFERA.

Cap. XLIV. - FENOMENI ACUSTICI DELL'ATMOSFERA.

Cap. XLV. - L'ELETTRICITÀ ATMOSFERICA.

Cap. XLVI. - LA PREVISIONE DEL TEMPO.